



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

**ANALISIS STABILITAS TRANSIEN DAN MEKANISME
PELEPASAN BEBAN AKIBAT PENAMBAHAN PEMBANGKIT
1x26,8 MW PADA SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA
GRESIK**

Rahmat Saiful Anwar
NRP 2213 100 045

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE141599

**THE TRANSIENT STABILITY ANALYSIS AND LOAD
SHEDDING MECHANISM AS THE EFFECT OF GENERATOR
INCREMENT 1x26,8 MW AT PT. PETROKIMIA GRESIK
ELECTRICAL SYSTEM**

Rahmat Saiful Anwar
NRP 2213 100 045

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Analisis Stabilitas Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban Akibat Penambahan Pembangkit 1x26,8 MW Pada Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017

Rahmat Saiful Anwar
NRP 2213 100 045

**ANALISIS STABILITAS TRANSIEN DAN MEKANISME
PELEPASAN BEBAN AKIBAT PENAMBAHAN
PEMBANGKIT 1x26,8 MW PADA SISTEM KELISTRIKAN
PT. PETROKIMIA GRESIK
TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,



Dr. Ir. Margo Pujiانتara, MT.
NIP : 196603181990101001

Dosen Pembimbing II,



Ir. Sjamsul Anam, MT.
NIP : 196307251990031002



[Halaman ini sengaja dikosongkan]

ANALISIS STABILITAS TRANSIEN DAN MEKANISME PELEPASAN BEBAN AKIBAT PENAMBAHAN PEMBANGKIT 1x26,8 MW PADA SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA GRESIK

Nama : Rahmat Saiful Anwar
Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Pembimbing II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRAK

Sistem tenaga listrik akan beroperasi dalam keadaan stabil jika terdapat keseimbangan antara daya mekanik penggerak utama (*prime mover*) dengan keluaran daya listriknya. Setiap kenaikan atau penurunan beban harus diikuti dengan perubahan daya mekanik *prime mover* generator. Apabila tidak segera menyesuaikan maka akan membuat sistem menjadi tidak stabil. Kelebihan daya mekanik terhadap daya listrik mengakibatkan percepatan putaran generator atau sebaliknya. Bila gangguan tidak dihilangkan dengan segera, maka percepatan atau perlambatan putaran rotor generator akan menyebabkan hilangnya sinkronisasi pada generator sinkron. Pada PT. Petrokimia Gresik yang dijadikan *plant* tugas akhir ini, terdapat penambahan pembangkit dan beban baru sehingga perlu dilakukan studi stabilitas transien untuk mengetahui keandalan sistem saat terjadi gangguan transien serta mendapatkan skema *Load Shedding* yang baru karena kondisi sistem berbeda dengan sebelumnya. Pada tugas akhir ini difokuskan pada kestabilan transien meliputi respon frekuensi, sudut rotor, dan tegangan serta mekanisme pelepasan beban akibat hubung singkat, motor starting, dan generator lepas. Hasil simulasi menunjukkan bahwa lepasnya 1 generator memerlukan pelepasan beban untuk mengembalikan kestabilan sistem. Dalam kasus hubung singkat di bus, tegangan sistem turun hingga mencapai kondisi terendah sehingga diperlukan pengisolasian gangguan melalui pembukaan *circuit breaker* di sumber gangguan. Selain itu, kasus *motor starting* masih diperbolehkan saat kondisi 3 generator menyala.

Kata Kunci : gangguan transien, kestabilan transien, pelepasan beban.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

THE TRANSIENT STABILITY ANALYSIS AND LOAD SHEDDING MECHANISM AS THE EFFECT OF GENERATOR INCREMENT 1x26,8 MW AT PT. PETROKIMIA GRESIK ELECTRICAL SYSTEM

Name : Rahmat Saiful Anwar
Advisor I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Advisor II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRACT

Power system will operate in a stable condition if there is a balance between the power of mechanical prime mover and electric power output. Each increment or decrease the load must be followed with changes mechanical prime mover generator power. If it does not immediately adjust then would make the system become unstable. The advantages of mechanical power to electrical power can make the acceleration of the generator or vice versa. If the interference cannot be eliminated immediately, the acceleration or deceleration round rotor generator will cause a loss of synchronization at synchronous generator. At PT. Petrokimia Gresik which is used as this final project plant, there is addition of new generator and load so it is necessary to do study transient stability to know system reliability during transient disturbance and to get new Load Shedding scheme due to different system conditions than before. This final project is focused on transient stability include frequency, the angle of the rotor, and voltage response. Then mechanism load shedding due to a short circuit, motor starting, and the generator off. Simulation results show that the loss of one generator requires the release of the load to restore the stability of the system In the case of a short circuit in the bus, the system voltage drops to the lowest condition so that it is necessary to isolate the disturbance through the opening of the circuit breaker at the source of interference. In addition, cases of motor starting current conditions still allowed when 3 generator turned on.

Keywords : transient disturbances, transient stability, load shedding.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, puja dan puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia yang tidak terkira berupa kekuatan, kesabaran, dan kelancaran sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Adapun tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah untuk menyelesaikan salah satu persyaratan mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu :

1. Allah SWT karena telah memberikan kelancaran dalam melaksanakan Tugas Akhir ini, dan semoga diberikan keberkahan atas apa yang telah dilalui
2. Segenap keluarga terutama Ibunda Musawamah, Ayahanda Budi serta adik tercinta Rizka Dwi Cahyati yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa untuk keberhasilan penulis.
3. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT dan Bapak Ir. Sjamsjul Anam, MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingannya.
4. Seluruh rekan asisten LIPIST “B-204” yang membantu kelancaran tugas akhir ini Aulia, Rahmat, Alfian, Kemal, Rizka, Iqdam, Jatu, Ali, Fauqi, Talitha, Kezia, Fahmi, Guntur, Ardi, Azha, dan Mas Viko.
5. Seluruh rekan kabinet “*Rise of Solidarity*” BEM FTI-ITS 2015/2016, Galih, ikhlas, igfar, Riris, Dian, Dwi, Yudha, Leddy, Adit, Rozi, Nisa, Jonathan, Rewinda, Panji, Doni, Anggun, Niza, Ali, Alfian, Yani, Januar, Novi, Bima, Gita, Axel. Kenangan bersama kalian tidak akan terlupakan.
6. Seluruh rekan e53 atas kebersamaan dan kerjasamanya selama ini.
7. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, para dosen, karyawan, mahasiswa, serta rekan-rekan HIMATEKTRO atas dukungan, masukan, dan kerjasamanya selama masa kuliah dan proses pengerjaan tugas akhir.

Tak ada gading yang tak retak. Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xvii
 BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Metodologi	2
1.5 Sistematika	4
1.6 Relevansi	5
 BAB 2 DASAR TEORI	
2.1 Kestabilan Sistem	7
2.2 Klasifikasi Kestabilan	8
2.2.1 Kestabilan Frekuensi.....	8
2.2.2 Kestabilan Sudut Rotor	9
2.2.3 Kestabilan Tegangan.....	9
2.3 Kestabilan Transien	10
2.3.1 Hubung Singkat.....	12
2.3.2 <i>Motor Starting</i>	12
2.3.3 Penambahan Beban Secara Tiba-Tiba.....	13
2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan	14
2.5 Pengaturan Frekuensi	18
2.6 Standar yang berkaitan dengan Kestabilan Transien	19
2.6.1 Standar Frekuensi.....	19
2.6.2 Standar Tegangan.....	21
2.7 Pelepasan Beban	21
2.7.1 Pelepasan Beban secara Manual.....	23

2.7.2 Pelepasan Beban secara Otomatis.....	23
--	----

BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA GRESIK

3.1 Sistem Kelistrikan di PT. Petrokimia Gresik.....	25
3.2 Data Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik.....	26
3.2.1 Generator PT. Petrokimia Gresik.....	26
3.2.2 <i>Transformator</i> PT. Petrokimia Gresik.....	27
3.2.3 Motor Terbesar PT. Petrokimia Gresik.....	29
3.2.4 Data Kabel PT. Petrokimia Gresik.....	29

BAB 4 ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PETROKIMIA GRESIK

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan.....	33
4.2 Studi Kasus Kestabilan Transien.....	33
4.3 Hasil Simulasi Kestabilan Transien dan Mekanisme Load Shedding.....	36
4.3.1 Studi Kasus Generator Revamp Gen Lepas dari sistem ($t=2s$).....	36
4.3.2 Studi Kasus ketika Generator Revamp Gen Lepas ($t=2s$) Dilanjutkan dengan Mekanisme Load Shedding	38
4.3.3 Studi Kasus GTG <i>off</i> dan <i>Utility</i> Lepas dari Sistem ($t=2s$)	40
4.3.4 Studi Kasus GTG <i>off</i> , <i>Utility</i> Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan Mekanisme <i>Load Shedding</i>	43
4.3.5 Studi Kasus GTG <i>off</i> dan Generator revamp Gen Lepas dari Sistem ($t=2s$)	45
4.3.6 Studi Kasus GTG <i>off</i> , Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan dengan Mekanisme Load Shedding	47
4.3.7 Studi Kasus GTG <i>off</i> dan GGCP Lepas dari Sistem ($t=2s$)	50
4.3.8 Studi Kasus GTG <i>off</i> , Generator GGCP Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan dengan Mekanisme Load Shedding	52
4.3.9 Studi Kasus GTG <i>off</i> dan Generator UBB Lepas dari Sistem ($t=2s$)	55
4.3.10 Studi Kasus GTG <i>off</i> , Generator UBB Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan Mekanisme <i>Load Shedding</i>	57
4.3.11 Studi Kasus GGCP <i>off</i> dan <i>Utility</i> Lepas dari Sistem ($t=2s$)	60
4.3.12 Studi Kasus GGCP <i>off</i> , <i>Utility</i> Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan Mekanisme <i>Load Shedding</i>	62

4.3.13 Studi Kasus GGCP off dan Generator Revamp gen Lepas dari Sistem ($t=2s$)	65
4.3.14 Studi Kasus GGCP off, Generator Revamp gen Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan Mekanisme <i>Load Shedding</i>	67
4.3.15 Studi Kasus GGCP off dan Generator GTG Lepas dari Sistem ($t=2s$)	69
4.3.16 Studi Kasus GGCP off, Generator GTG Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan Mekanisme <i>Load Shedding</i>	72
4.3.17 Studi Kasus Short Circuit Bus LV2 SWGR	74
4.3.18 Studi Kasus Short Circuit Bus PS-2281 A-1	76
4.3.19 Studi Kasus Short Circuit Bus UBB 20 kV B	79
4.3.20 Studi Kasus Motor P21201A <i>Start</i>	84
4.4 Rekapitulasi Data	87

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan	93
5.2 Saran	93

DAFTAR PUSTAKA	95
-----------------------------	-----------

BIODATA PENULIS	97
------------------------------	-----------

LAMPIRAN	99
-----------------------	-----------

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Studi.....	4
Gambar 2.1	Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga.....	8
Gambar 2.2	Skema Perilaku Generator Ketika Gangguan.....	11
Gambar 2.3	Respon Sudut Rotor terhadap Gangguan Transien	13
Gambar 2.4	Blok Diagram Konsep Dasar Speed Governing	18
Gambar 2.5	Standar Frekuensi Untuk Steam Turbin Generator (IEEE Std C37.106-2003).....	20
Gambar 2.6	Definisi Voltage Magnitude Event berdasarkan Standar IEEE 1159-195.....	21
Gambar 2.7	Perubahan Frekuensi sebagai waktu dengan Adanya Pelepasan beban.....	20
Gambar 3.1	Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik	25
Gambar 3.2	Karakteristik motor P21201A	30
Gambar 4.1	Respon Frekuensi Bus Ketika Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem.....	36
Gambar 4.2	Respon Sudut Rotor Ketika Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem.....	37
Gambar 4.3	Respon Tegangan Bus ketika Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem.....	37
Gambar 4.4	Respon Frekuensi Bus Ketika Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem Dilanjutkan Dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i>	39
Gambar 4.5	Respon Sudut Rotor ketika Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem Dilanjutkan Dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i>	39
Gambar 4.6	Respon Tegangan Bus ketika Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem Dilanjutkan dengan Mekanisme <i>Load Shedding</i>	40
Gambar 4.7	Respon Frekuensi Bus ketika <i>Utility</i> PLN Lepas dari Sistem	41
Gambar 4.8	Respon Sudut Rotor Ketika <i>Utility</i> PLN Lepas dari Sistem	41
Gambar 4.9	Respon Tegangan Bus ketika <i>Utility</i> PLN Lepas dari Sistem	42
Gambar 4.10	Respon Frekuensi Bus ketika <i>Utility</i> PLN Lepas Dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i>	43

Gambar 4.11	Respon Sudut Rotor Ketika <i>Utility</i> PLN Lepas Dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i>	44
Gambar 4.12	Respon Tegangan Bus ketika <i>Utility</i> PLN Lepas Dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i>	45
Gambar 4.13	Respon Frekuensi Bus ketika Revamp Gen Lepas dari Sistem Menggunakan Pola Operasi 2.....	46
Gambar 4.14	Respon Sudut Rotor Bus Ketika Revamp Gen Lepas dari Sistem Menggunakan Pola Operasi 2.....	46
Gambar 4.15	Respon Tegangan Bus ketika Revamp Gen Lepas dari Sistem Menggunakan Pola Operasi 2.....	47
Gambar 4.16	Respon Frekuensi Bus ketika Revamp Gen Lepas Dilanjutkkan dengan <i>Load Shedding</i> Menggunakan Pola Operasi 2	48
Gambar 4.17	Respon Sudut Rotor Generator ketika Revamp Gen Lepas Dilanjutkkan dengan <i>Load Shedding</i> Menggunakan Pola Operasi 2.....	48
Gambar 4.18	Respon Tegangan Bus ketika Revamp Gen Lepas Dilanjutkkan dengan <i>Load Shedding</i> Menggunakan Pola Operasi 2	49
Gambar 4.19	Respon Frekuensi Bus ketika GGCP Lepas Menggunakan Pola Operasi 2.....	50
Gambar 4.20	Respon Sudut Rotor ketika GGCP Lepas Menggunakan Pola Operasi 2	51
Gambar 4.21	Respon Tegangan Bus ketika GGCP Lepas Menggunakan Pola Operasi 2.....	51
Gambar 4.22	Respon Frekuensi ketika Generator GGCP Lepas Dilanjutkan dengan Load Shedding	53
Gambar 4.23	Respon Sudut Rotor ketika GGCP Lepas Dilanjutkan dengan Load Shedding	53
Gambar 4.24	Respon Tegangan ketika GGCP Lepas Dilanjutkan dengan Load Shedding	54
Gambar 4.25	Respon Frekuensi Ketika Generator UBB Lepas Menggunakan Pola Operasi 2.....	55
Gambar 4.26	Respon Sudut Rotor ketika Generator UBB Lepas Menggunakan Pola Operasi 2.....	56
Gambar 4.27	Respon Tegangan ketika Generator UBB Lepas Menggunakan Pola Operasi 2.....	56
Gambar 4.28	Respon Frekuensi ketika Generator UBB Lepas Dilanjutkan Mekanisme <i>Load Shedding</i>	58

Gambar 4.29	Respon Sudut Rotor ketika Generator UBB Lepas Dilanjutkan Mekanisme <i>Load Shedding</i>	58
Gambar 4.30	Respon Tegangan ketika Generator UBB Lepas dan Mekanisme <i>Load Shedding</i>	59
Gambar 4.31	Respon Frekuensi Bus ketika <i>Utility</i> PLN Lepas Menggunakan Pola Operasi 3	60
Gambar 4.32	Respon Sudut Rotor Ketika <i>Utility</i> PLN Lepas Menggunakan Pola Operasi 3	61
Gambar 4.33	Respon Tegangan Bus ketika <i>Utility</i> PLN Lepas Menggunakan Pola Operasi 3	62
Gambar 4.34	Respon Sudut Rotor Ketika <i>Utility</i> PLN Lepas Dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i> Menggunakan Pola Operasi	63
Gambar 4.35	Respon Sudut Rotor Ketika <i>Utility</i> PLN Lepas Dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i> Status Menggunakan Pola Operasi 3	63
Gambar 4.36	Respon Tegangan Bus ketika <i>Utility</i> PLN Lepas Dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i> Menggunakan Pola Operasi 3	64
Gambar 4.37	Respon Frekuensi Bus ketika Revamp Gen Lepas Menggunakan Pola Operasi 3	65
Gambar 4.38	Respon Sudut Rotor Bus Ketika Revamp Gen Lepas Menggunakan Pola Operasi 3	66
Gambar 4.39	Respon Tegangan Bus ketika Revamp Gen Lepas Menggunakan Pola Operasi 3	66
Gambar 4.40	Respon Frekuensi Bus ketika Revamp Gen Lepas Dilanjuttkkan dengan <i>Load Shedding</i> Menggunakan Pola Operasi 3	67
Gambar 4.41	Respon Sudut Rotor Generator ketika Revamp Gen Lepas Dilanjuttkkan dengan <i>Load Shedding</i> Menggunakan Pola Operasi 3	68
Gambar 4.42	Respon Tegangan Bus ketika Revamp Gen Lepas Dilanjuttkkan dengan <i>Load Shedding</i> Menggunakan Pola Operasi 3	69
Gambar 4.43	Respon Frekuensi ketika Geneartor GTG Lepas Menggunakan Pola Operasi 3	70
Gambar 4.44	Respon Sudut Rotor ketika Generator GTG Lepas Menggunakan Pola Operasi 3	70

Gambar 4.45	Respon Tegangan ketika GTG Lepas Menggunakan Pola Operasi 3	71
Gambar 4.46	Respon Frekuensi ketika Generator GTG Lepas Dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i> Menggunakan Pola Operasi 3	72
Gambar 4.47	Respon Sudut Rotor ketika GTG Lepas Dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i> Menggunakan Pola Operasi 3	73
Gambar 4.48	Respon Tegangan ketika GTG Lepas Dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i> Menggunakan Pola Operasi 3.....	73
Gambar 4.49	Respon Frekuensi ketika Short Circuit di Bus LV2 SWGR	74
Gambar 4.50	Respon Sudut Rotor ketika Short Circuit di Bus LV2 SWGR	75
Gambar 4.51	Respon Tegangan ketika Short Circuit di Bus LV2 SWGR	76
Gambar 4.52	Respon Frekuensi ketika Short Circuit di Bus PS-2281 A-1.....	77
Gambar 4.53	Respon Sudut Rotor ketika Short Circuit di Bus PS-2281 A-1.....	77
Gambar 4.54	Respon Tegangan ketika Short Circuit di Bus PS-2281 A-1.....	78
Gambar 4.55	Respon Frekuensi ketika Short Circuit di Bus UBB 20kV B	79
Gambar 4.56	Respon Sudut Rotor ketika Short Circuit di Bus UBB 20kV B	80
Gambar 4.57	Respon Tegangan ketika Short Circuit di Bus UBB 20kV B	81
Gambar 4.58	Respon Frekuensi ketika Short Circuit di Bus UBB 20kV B Dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i>	82
Gambar 4.59	Respon Sudut Rotor Ketika Short Circuit di Bus UBB 20kV B Dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i>	82
Gambar 4.60	Respon Tegangan Ketika Short Circuit di Bus UBB 20kV B Dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i>	83
Gambar 4.61	Respon Frekuensi ketika Motor P21201A <i>Start</i>	84
Gambar 4.62	Respon Sudut Rotor ketika Motor P21201A <i>Start</i>	85
Gambar 4.63	Respon Tegangan ketika Motor P21201A <i>Start</i>	86

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan, dan <i>Demand</i> .	26
Tabel 3.2	Data Spesifikasi Generator	26
Tabel 3.3	Data Spesifikasi Generator (lanjutan).....	27
Tabel 3.4	Data Transformator Distribusi di PT. Petrokimia Gresik.	28
Tabel 3.5	Data Spesifikasi Motor P21201A dalam kondisi belum beroperasi	29
Tabel 3.6	Data kabel PT. Petrokimia Gresik	30
Tabel 3.7	Data kabel PT. Petrokimia Gresik (lanjutan).....	31
Tabel 4.1	Studi Kasus Kestabilan Transien.....	34
Tabel 4.2	Studi Kasus Kestabilan Transien (lanjutan)	35
Tabel 4.3	Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Generator <i>Outage</i>	87
Tabel 4.4	Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Generator <i>Outage</i> (lanjutan)	88
Tabel 4.5	Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Generator <i>Outage</i> (lanjutan)	89
Tabel 4.6	Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Generator <i>Outage</i> (lanjutan)	90
Tabel 4.7	Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Ketika Hubung Singkat.....	91
Tabel 4.8	Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan <i>Motor Starting</i>	91

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Dewasa ini, perkembangan sistem tenaga listrik menyebabkan permasalahan stabilitas pada suatu sistem menjadi salah satu hal yang sangat penting untuk menjaga kontinuitas aliran daya serta keandalan operasi dari sistem tenaga listrik. Pada sistem kelistrikan yang memiliki lebih dari dua generator yang bekerja secara bersamaan memungkinkan terjadinya kerugian besar jika kontinuitas daya tidak stabil[1]. Dalam keadaan normal, sistem dikatakan stabil jika terjadi keseimbangan antara besarnya daya input mekanik pada penggerak utama generator (prime mover) dan daya output listrik yang disalurkan menuju beban. Kenaikan dan penurunan jumlah beban akan mempengaruhi daya listrik yang dihasilkan oleh generator sehingga prime mover perlu untuk menyesuaikan daya input mekanik yang diperlukan agar kestabilan sistem akan tetap terjaga.

Kestabilan transien sangat berkaitan dengan gangguan yang terjadi secara tiba-tiba dalam periode waktu yang sangat cepat misalnya lepasnya generator dari sistem kelistrikan (*generator outage*), gangguan hubung singkat (*short circuit*), serta penyalan motor (*motor starting*). Jika gangguan besar yang terjadi tidak dihilangkan dalam rentang waktu tertentu, maka hal ini akan menyebabkan sinkronisasi generator dengan sistem akan hilang[2]. Kestabilan sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi 3 yaitu kestabilan frekuensi, kestabilan tegangan, dan kestabilan sudut rotor[3].

PT. Petrokimia Gresik hingga saat ini memiliki pabrik dengan suplai daya yang berasal dari PLN dan empat pembangkit mandiri. Penambahan pembangkit berkapasitas 26,8 MW mengakibatkan bertambahnya kemampuan pembangkitan energi listrik yang dimiliki oleh PT. Petrokimia Gresik. Oleh karena itu, diperlukan adanya analisa kestabilan transien pada sistem kelistrikan yang baru untuk menjaga sistem tetap dalam kondisi stabil setelah mendapat gangguan sekaligus menentukan skema pelepasan beban untuk sistem yang baru. Analisa kestabilan transien yang dilakukan meliputi *generator outage*, *short circuit*, dan *motor starting*.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini meliputi :

1. Mengetahui pola operasi sistem kelistrikan di PT. Petrokimia Gresik setelah penambahan pembangkit dan beban baru pada area Amurea II.
2. Melakukan simulasi analisa kestabilan transien meliputi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik yang baru.
3. Mendapatkan pola mekanisme pelepasan beban (*load shedding*) yang handal sehingga mampu mengatasi gangguan transien yang mungkin terjadi di PT. Petrokimia Gresik.

1.3 Tujuan

Tugas akhir ini memiliki tujuan sebagai berikut :

1. Melakukan pemodelan, simulasi, dan analisis pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik setelah penambahan pembangkit dan beban baru pada area Amurea II.
2. Menganalisis kestabilan transien pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik yang baru sehingga mampu mengatasi gangguan yang mungkin terjadi.
3. Mendapatkan skema *load shedding* yang handal untuk menjamin kemampuan sistem kembali pulih akibat adanya gangguan yang dapat mengganggu kestabilan sistem.

1.4 Metodologi

Metode penelitian yang digunakan pada tugas akhir ini sebagai berikut :

1. Pengumpulan Data

Data-data yang dibutuhkan dalam Tugas Akhir ini adalah data *single line diagram* dan peralatan-peralatan listrik PT. Petrokimia Gresik meliputi: generator (governor dan eksiter), rating kabel, transformator, motor listrik, bus serta pola operasinya.

2. Pemodelan Sistem

Pada tahap ini dilakukan pemodelan sistem sekaligus memasukkan data dalam bentuk *Single line diagram*. Pemodelan sistem dilakukan agar dapat dilakukan analisis *Power Flow* dan *Transient Stability*.

3. Simulasi dan Analisis Power Flow

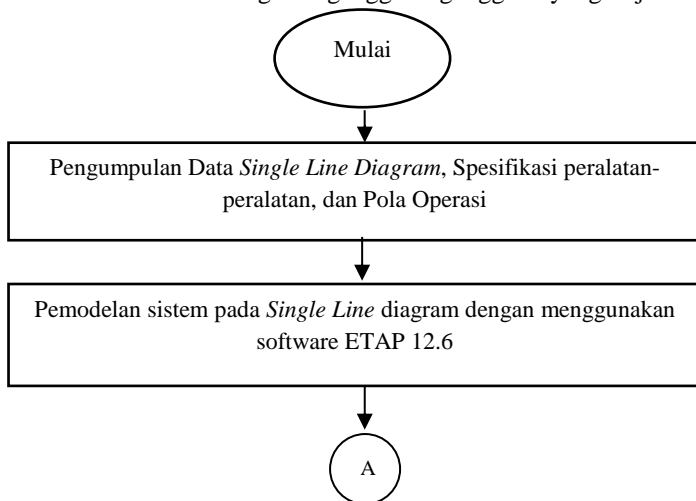
Hasil dari simulasi *Power Flow* digunakan untuk mengetahui aliran daya pada *Single line diagram* dan menganalisis skema operasi yang digunakan. Aliran daya pada sistem ini menjadi acuan dalam menentukan studi kasus transien yang dilakukan dengan mempertimbangkan kategori pembebanan dan sebagai acuan dalam pelepasan beban (memilih beban yang harus dilepas) saat terjadi gangguan transien agar sistem tetap dalam keadaan stabil.

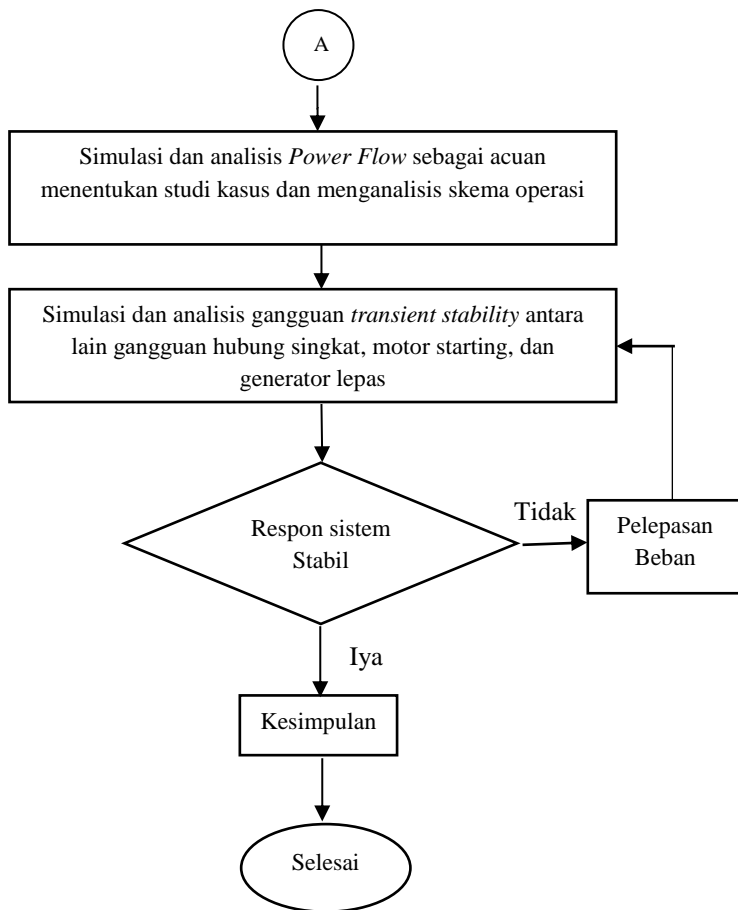
4. Simulasi dan Analisis Kestabilan Transien

Dari simulasi sistem selanjutnya akan didapatkan hasil yang akan dianalisis. Gangguan transien yang disimulasikan ada tiga, yaitu gangguan hubung singkat, motor starting, dan generator lepas. Data yang akan dianalisis adalah respon dari kestabilan transien pada sistem kelistrikan di PT. Petrokimia Gresik berupa respon frekuensi, sudut rotor, dan tegangan yang nantinya dijadikan referensi untuk mendapatkan sistem yang stabil sesuai dengan standar. Apabila keadaan sistem belum stabil maka perlu dilakukan mekanisme pelepasan beban (*Load Shedding*) sesuai studi kasus yang telah direncanakan.

5. Kesimpulan

Memberikan kesimpulan mengenai kestabilan sistem akibat gangguan transien pada PT. Petrokimia Gresik serta memberikan rekomendasi untuk mengatasi gangguan-gangguan yang terjadi.





Gambar 1.1 Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Studi

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut:

- Bab I : Pendahuluan
Menjelaskan tentang latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi atau manfaat.
- Bab II : Kestabilan Sistem Tenaga
Secara umum menjelaskan tentang kestabilan transien dan konsep pelepasan beban.
- Bab III : Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik.
Menjelaskan tentang sistem kelistrikan industri dan spesifikasi beban pada PT. Petrokimia Gresik setelah adanya penambahan pembangkit baru
- BAB IV : Simulasi dan Analisis
Membahas hasil simulasi stabilitas transien pada generator dan bus ketika terjadi gangguan generator *outage*, *short circuit*, motor *starting*. Hal yang perlu diperhatikan dalam hasil simulasi stabilitas transien yaitu kestabilan frekuensi, sudut rotor, dan tegangan sebelum, saat dan setelah terjadi gangguan.
- BAB V : Penutup
Memberikan kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah diperoleh.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan memberi manfaat sebagai berikut:

1. Melalui tugas akhir ini, diharapkan dapat menjadi referensi dan rekomendasi bagi PT. Petrokimia Gresik, khususnya berkaitan kestabilan transien, sehingga kontinuitas dan keandalan operasi sistem terjamin .
2. Tugas akhir ini dapat dijadikan referensi pada penelitian berikutnya tentang stabilitas transien pada sistem kelistrikan industri.

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB 2

KESTABILAN TRANSIEN

2.1 Kestabilan Sistem

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk kembali pada kondisi normal setelah mendapatkan atau mengalami gangguan. Sistem tenaga listrik dapat dikatakan stabil ketika terdapat keseimbangan antara daya input mekanis yang disebut daya mekanik pada *prime mover* dan daya output listrik yang disebut daya elektrik pada sistem. Dalam keadaan seimbang, daya mekanik pada generator dan daya elektrik pada sistem bergerak secara bersamaan dengan kecepatan konstan. Sedangkan dalam kondisi tidak seimbang terjadi perbedaan besaran antara daya mekanik dan daya elektrik pada sistem. Daya mekanik yang lebih besar dari daya elektrik akan menyebabkan putaran rotor generator mengalami percepatan karena beban yang ditanggung generator semakin ringan. Daya elektrik yang lebih besar dari daya mekanik akan menyebabkan putaran rotor generator mengalami perlambatan karena generator semakin terbebani. Percepatan atau perlambatan putaran rotor generator yang terus menerus terjadi akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam suatu sistem tenaga listrik. Analisis kestabilan diperlukan untuk menjaga pembangkit yang terganggu agar tetap sinkron dengan sistem.

Upaya untuk mengembalikan sistem dalam kondisi stabil ketika terjadi gangguan disebut periode transien. Kriteria utama stabilitas adalah bagaimana mesin-mesin mempertahankan sinkronisasi pada akhir periode transien. Jika selama periode transien, sistem tenaga memiliki respon osilasi yang mengikuti gangguan teredam menuju kondisi mantap maka sistem termasuk kategori stabil. Sedangkan jika respon osilasi sistem tenaga tidak mengikuti gangguan teredam menuju kondisi mantap maka sistem termasuk kategori tidak stabil[5].

Gangguan yang mempengaruhi kestabilan dalam sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi 2 macam, yaitu gangguan kecil dan gangguan besar. Gangguan kecil berupa perubahan beban yang berlangsung terus menerus. Gangguan besar seperti lepasnya generator, terjadinya hubung singkat.

2.2 Klasifikasi Kestabilan

Berdasarkan paper IEEE *Transactions On Power Systems* dengan judul *Definition and Classification of Power System Stability*, kestabilan sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi tiga, yaitu [1]:

1. Kestabilan frekuensi
2. Kestabilan sudut rotor
3. Kestabilan tegangan



Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga (IEEE *Transactions on Power System* vol. 19, no. 2, may 2004)

2.2.1 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi agar tetap dalam kondisi stabil ketika terjadi gangguan sistem yang besar akibat ketidakseimbangan antara suplai daya dan beban. Biasanya gangguan ini berupa perubahan pembangkitan atau beban yang signifikan [2]. Titik keseimbangan antara

suplai daya sistem dan beban harus dipertahankan untuk menjaga sistem dari hilangnya sinkronisasi.

Klasifikasi kestabilan frekuensi diklasifikasikan menjadi 2 yaitu jangka panjang dan jangka pendek. Kestabilan frekuensi jangka panjang disebabkan oleh kontrol *governor* tidak bekerja ketika terdapat gangguan. Rentang waktu fenomena jangka panjang yaitu puluhan detik hingga beberapa menit. Kestabilan frekuensi jangka pendek adalah terjadinya perubahan beban yang besar sehingga generator tidak mampu untuk menyesuaikan kebutuhan daya pada sistem.

2.2.2 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan dari mesin-mesin sinkron yang saling terinterkoneksi pada suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron setelah terjadi gangguan. Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan untuk mempertahankan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik pada masing-masing mesin. Ketidakstabilan dapat mengakibatkan perubahan kecepatan sudut ayunan pada generator sehingga generator mengalami hilang sinkronisasi dengan generator yang lain. Hal tersebut disebabkan daya output dari generator berubah sesuai dengan berubahnya sudut rotor [3].

Hal yang mempengaruhi kestabilan sudut rotor antara lain gangguan kecil dan gangguan besar. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika sistem mengalami gangguan berat, seperti hubung singkat. Studi stabilitas transien memiliki kurun waktu 3-5 detik setelah gangguan. Untuk sistem yang sangat besar dengan ayunan antar wilayah yang dominan maka kurun waktu dapat diperpanjang menjadi 10-20 detik. Kestabilan sudut rotor kecil dan kestabilan transien dikategorikan sebagai fenomena jangka pendek.

Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kesinkronan akibat gangguan kecil. Studi kestabilan ini mempunyai kurun waktu 10-20 detik setelah gangguan. Ketidakstabilan ini terjadi akibat dua hal antara lain kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya torsi *damping*.

2.2.3 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi tegangan pada semua bus sistem untuk tetap stabil setelah mengalami gangguan. Hal ini bergantung pada kemampuan

untuk mempertahankan kesetimbangan antara *supply* daya pembangkit dan kebutuhan beban. Biasanya gangguan yang terjadi adalah lepasnya beban yang signifikan dan lepasnya generator sehingga tegangan menjadi drop [1]. Kestabilan tegangan dipengaruhi oleh gangguan besar dan gangguan kecil dalam jangka pendek serta jangka lama.

Kestabilan tegangan gangguan besar adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk menjaga tegangan *steady* tetap stabil setelah mengalami gangguan besar seperti *generator outage* atau hilangnya pembangkitan dan *short circuit* [5]. Kestabilan tegangan gangguan kecil yaitu kemampuan untuk mempertahankan tegangan sistem tenaga listrik ketika terjadi gangguan kecil seperti terjadi perubahan beban kecil. Kestabilan tegangan gangguan kecil digunakan sebagai evaluasi tegangan sistem merespon perubahan kecil beban listrik.

Gangguan kestabilan tegangan jangka pendek mengakibatkan kedip tegangan (*voltage sags*) dan kenaikan tegangan (*swells*). Kedip Tegangan (*voltage Sag*) adalah fenomena penurunan *magnitude* tegangan efektif terhadap harga nominalnya selama periode antara 0,5 cycle hingga 1 menit. Kenaikan Tegangan merupakan fenomena peningkatan *magnitude* tegangan efektif terhadap harga nominalnya dengan durasi antara 0,5 cycle hingga 1 menit. Gangguan kestabilan tegangan jangka panjang mengakibatkan tegangan lebih (*overvoltage*) dan tegangan kurang (*undervoltage*). Tegangan lebih merupakan peningkatan nilai efektif tegangan hingga melebihi 110% dari tegangan nominal ketika melebihi satu menit. Tegangan kurang merupakan penurunan nilai efektif tegangan hingga melebihi 90% dari tegangan nominal ketika melebihi satu menit.

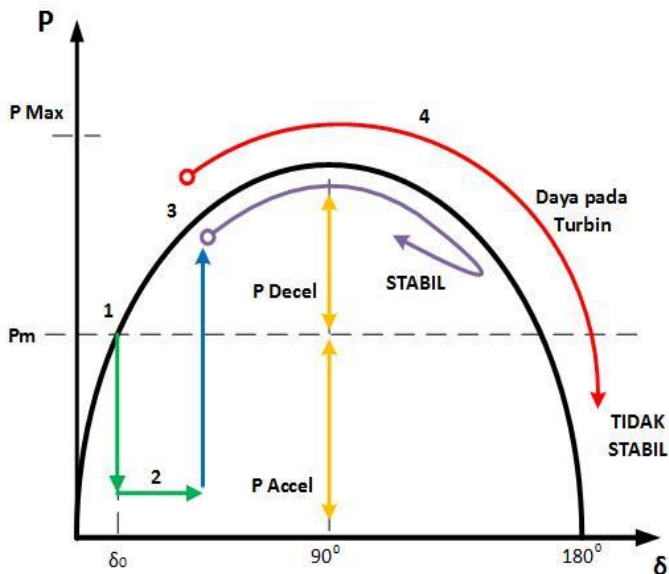
2.3 Kestabilan Transien

Kestabilan transien adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron ketika mengalami gangguan transien berupa gangguan besar yang terjadi secara tiba-tiba pada sistem tenaga. Analisis kestabilan transien harus dilakukan pada sebuah sistem untuk mengetahui apakah sistem dapat bertahan ketika terjadi gangguan transien. Sebuah sistem dikatakan stabil ketika kondisi *steady state*, namun belum tentu stabil ketika terjadi gangguan transien.

Dasar sistematis untuk klasifikasi kestabilan didasarkan atas pertimbangan sebagai berikut [2]:

1. Ukuran dari gangguan
2. Pemodelan yang tepat dan analisis gangguan yang spesifik
3. Rentang waktu saat gangguan berlangsung

4. Parameter sistem yang paling berpengaruh



Gambar 2.2 Skema Perilaku Generator Ketika Terjadi Gangguan

Nomor pada Gambar 2.2 mengilustrasikan keadaan generator ketika terjadi gangguan. Ilustrasi keadaan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut :

- 1 Keadaan generator sebelum terjadi gangguan
- 2 Keadaan generator ketika terjadi gangguan menyebabkan output dari generator berkurang. Akibatnya muncul perbedaan daya output generator dengan daya mekanis turbin. Pada periode tersebut rotor pada generator mengalami percepatan, sedangkan sudut rotor bertambah besar.
- 3 Keadaan ketika gangguan hilang, sehingga daya output generator pulih kembali sesuai dengan kurva P dan δ .
- 4 Keadaan setelah gangguan hilang. Daya output generator menjadi lebih besar dari daya mekanis turbin. Hal ini membuat rotor pada generator mengalami perlambatan. Jika terdapat torsi lawan yang cukup untuk mengimbangi percepatan ketika terjadi gangguan, maka sistem akan stabil dalam ayunan pertama.

Namun jika bila kopel tersebut tidak mampu menahan gangguan, maka sudut rotor/daya akan bertambah besar, sehingga sistem kehilangan sinkronisasi.

Transient Stability Assessment atau studi tentang kestabilan transien harus dilakukan karena suatu sistem dapat dikatakan stabil pada kestabilan *steady state*, namun belum tentu stabil pada kestabilan transien, sehingga studi ini perlu dilakukan guna untuk mengetahui apakah sistem dapat kembali stabil saat gangguan transien terjadi. Gangguan kestabilan transien dapat terjadi karena beberapa faktor, yaitu :

- a) Beban lebih akibat lepasnya generator dari sistem
- b) Hubungan singkat (*short circuit*)
- c) *Starting* pada motor
- d) Pelepasan beban yang mendadak

2.3.1. Hubung Singkat (*Short Circuit*)

Gangguan hubung singkat merupakan gangguan yang paling sering terjadi dalam satu sistem tenaga listrik. Gangguan hubung singkat ini dapat disebabkan adanya sambaran petir, kegagalan isolasi, gangguan binatang dan ranting pohon. Saat terjadi hubung singkat, arus yang mengalir menuju titik gangguan bernilai sangat besar sehingga tegangan di sekitar titik gangguan akan menurun secara signifikan. Semakin besar arus hubung singkat maka semakin rendah tegangan di sekitar titik gangguan. Hal ini akan mengakibatkan kestabilan sistem menjadi terganggu. Selain itu dapat merusak peralatan karena nilai arus yang sangat besar.

2.3.2. Motor Starting

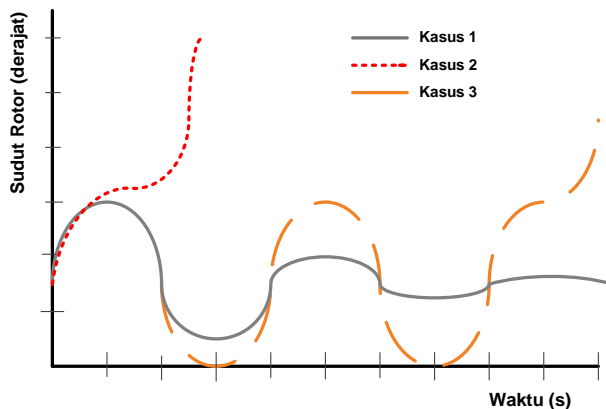
Pada saat motor di *start*, terdapat arus yang sangat tinggi yang besarnya berkali-kali dari arus nominal. Arus ini disebut dengan *locked rotor current* (LRC) yang nilainya bervariasi pada tiap motor. Arus *starting* yang sangat besar ini akan mengakibatkan drop tegangan pada sistem. Hal ini dikarenakan arus yang besar ini melewati impedansi saluran, trafo sehingga drop tegangan pada saluran semakin besar. Selain itu arus *starting* yang besar juga akan mengakibatkan rugi-rugi daya aktif pada saluran bertambah besar sehingga dapat menurunkan frekuensi generator. Drop tegangan dan turunnya frekuensi ini dapat mengakibatkan kestabilan sistem menjadi terganggu.

2.3.3. Penambahan Beban secara Tiba-Tiba

Penambahan beban pada suatu sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan timbulnya gangguan peralihan jika:

- a) Jumlah beban melebihi batas kestabilan keadaan mantap
- b) Jika beban dinaikkan sampai terjadi osilasi, sehingga menyebabkan sistem mengalami ayunan yang melebihi titik kritis dan tidak dapat kembali.

Apabila sistem tenaga listrik dilakukan pembebanan dengan beban penuh secara tiba-tiba, maka arus yang diperlukan sangat besar akibatnya frekuensi sistem akan turun dengan cepat. Pada kondisi demikian sistem akan keluar dari keadaan sinkron walaupun besar beban belum mencapai batas kestabilan mantap yaitu daya maksimumnya. Hal ini dikarenakan daya keluar listrik generator jauh melampaui daya masukan mekanis generator atau daya yang dihasilkan penggerak mula, dan kekurangan ini disuplai dengan berkurangnya energi kinetis generator. Sehingga putaran rotor generator melambat atau frekuensi sistem turun, sudut daya δ bertambah besar dan melampaui sudut kritisnya, akibatnya generator akan lepas sinkron atau tidak stabil. Sesaat dilakukannya pembebanan tersebut, rotor generator akan mengalami ayunan dan getaran yang besar.



Gambar 2.3 Respon Sudut Rotor terhadap Gangguan Transien

Karakteristik mesin sinkron untuk kondisi stabil dan tidak stabil ditunjukkan pada Gambar 2.3 diatas. Terdapat 3 kasus pada gambar tersebut, pada kasus pertama sudut rotor mengalami kenaikan hingga nilai

maksimum kemudian berosilasi sehingga sudut rotor kembali mencapai kondisi stabil. Pada kasus kedua, rotor kehilangan sinkronisasi sehingga sudut rotor terus naik mencapai kondisi tidak stabil saat ayunan pertama. Adapun penyebab utama pada kasus ini adalah kurangnya sinkronisasi torsi. Pada kasus ketiga, sistem tetap stabil saat ayunan pertama namun pada kondisi akhir sistem menjadi tidak stabil. Bentuk tidak stabil pada kasus ini umumnya terjadi pada kondisi *postfault steady-state*, bukan akibat dari gangguan transien melainkan akibat dari gangguan dinamik.

Sudut rotor, frekuensi, dan periode transien akan berubah selama periode transien dan *magnitude* dari tegangan kumparan medan akan dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu :

- Arus induksi pada kumparan peredam (*damper winding*) selama terjadinya perubahan nilai arus pada kumparan jangkar. Periode ini terjadi pada 0,1 s dan disebut efek *subtransient*
- Arus induksi pada kumparan medan selama terjadinya perubahan mendadak pada arus kumparan jangkar. Periode ini terjadi pada 2 s dan disebut efek *transient*.

Kestabilan transien dapat dideteksi dengan adanya hentakan yang kuat, yaitu gangguan yang dipertahankan dalam waktu yang singkat yang menyebabkan reduksi terminal mesin dan kemampuan transfer daya. Estimasi nilai transfer daya pada mesin tunggal yang terhubung ke *infinite bus* dapat dihitung melalui persamaan berikut :

$$P = \frac{V_t V_\infty}{X} \sin \delta \quad (2.1)$$

Dimana,

V_t = tegangan terminal mesin

V_∞ = tegangan *infinite bus*

V_t berbanding lurus dengan P, sehingga jika V_t tereduksi, maka P akan tereduksi oleh nilai terkait. Diperlukan aksi yang sangat cepat pada sistem eksitasi dalam memberikan eksitasi pada kumparan medan guna mencegah reduksi pada P. Oleh karena itu, nilai V_t akan dipertahankan pada nilai yang layak. Perubahan yang cepat juga diperlukan pada eksitasi ketika reaktansi X bertambah pada peristiwa pemutusan (*switching*).

2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

Pada rotor mesin sinkron, pengaturan pergerakannya berdasarkan pada prinsip dasar dinamika. Prinsip ini menyatakan bahwa momen putar

percepatan (*accelerating torque*) merupakan hasil perkalian dari percepatan sudutnya dan momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor [4]. Dalam sistem unit MKS persamaan generator sinkron dapat ditulis :

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.2)$$

Dimana,

- J : Momen inersia total dari massa rotor dalam $kg \cdot m^2$
- θ_m : Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam dalam radian mekanis (rad)
- T_e : Momen putar elektrik atau elektromagnetik, (N-m)
- T_a : Momen putar kecepatan percepatan bersih (*net*), (N-m)
- t : Waktu dalam detik (s)
- T_m : Momen putar mekanis atau poros penggerak yang diberikan oleh *prime mover* dikurangi dengan momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran (N-m)

Pada generator sinkron momen putar mekanis T_m dan momen putar elektrik T_e dianggap positif. Sehingga bila T_a bernilai negative maka generator mengalami perlambatan. Namun bila T_a bernilai positif maka generator mengalami percepatan, sedangkan. Bila T_a bernilai nol maka tidak ada percepatan atau perlambatan terhadap massa rotor. Sehingga kecepatan tetap resultan adalah kecepatan sinkron. Massa yang berputar meliputi rotor dari generator dan *prime mover*. Dalam sistem daya tersebut dikatakan dalam keadaan sinkron.

Kecepatan rotor bersifat *relative* terhadap kecepatan sinkron. Untuk mengukur posisi sudut rotor lebih baik menggunakan sumbu referensi yang berputar pada kecepatan sinkron. Oleh karena itu dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2.3)$$

Dimana,

- ω_{sm} : Kecepatan sinkron mesin (*radians/detik*)
- δ_m : Sudut pergeseran rotor, dalam *mechanical radians*, dari sumbu referensi putaran sinkron (derajat)

θ_m adalah sudut antara generator sebelum dibebani dan setelah dibebani. θ_m diukur dengan sumbu referensi stasioner pada stator, sehingga θ_m adalah ukuran mutlak dari sudut rotor. Sehingga hal ini membuat θ_m akan terus bertambah dengan waktu bahkan pada kecepatan sinkron yang tetap.

Penurunan persamaan (2.3) :

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.4)$$

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.5)$$

Persamaan 2.3 menunjukkan bahwa kecepatan sudut rotor $\frac{d\theta_m}{dt}$ adalah konstan dan kecepatan sinkron hanya ketika $\frac{d\delta_m}{dt}$ bernilai nol. $\frac{d\delta_m}{dt}$ adalah deviasi kecepatan rotor saat sinkron dengan satuan pengukuran *mechanical radians per second*. Sedangkan persamaan (2.5) menunjukkan percepatan rotor dikur pada mekanikal radian per *second* kuadrat.

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.5) pada (2.2), maka didapatkan:

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad \text{N-m} \quad (2.6)$$

Untuk mempermudah persamaan kecepatan sudut rotor didefinisiakan sebagi berikut:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.7)$$

Menurut prinsip dasar dinamika rotor yang menyatakan bahwa daya (P) adalah perkalian antara Torsi dengan kecepatan sudut, sehingga dari persamaan (2.6) dikalikan dengan ω_m , maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$J\omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad W \quad (2.8)$$

Dimana,

P_m : Daya mekanis

P_e : Daya elektrik

P_a : Daya percepatan yang menyumbang ketidakseimbangan diantara keduanya

Koefisien $J\omega_m$ adalah momentum sudut rotor pada kecepatan sinkron ω_{sm} , dinotasikan dengan M (konstanta inersia mesin). Satuan M yaitu *joule-seconds per mechanical radian* , dan dapat ditulis:

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad W \quad (2.9)$$

Pada studi kestabilan transien terdapat suatu konstanta yang sering dijumpai yaitu inersia mesin (H). H menunjukkan suatu kemampuan dari sebuah mesin sinkron untuk menahan gangguan. H dapat didefinisikan pada persamaan :

$$H = \frac{\text{Daya kinetis yang disimpan dalam megajoule pada kecepatan sinkron}}{\text{rating mesin dalam MVA}} \quad (2.10)$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{mach}} \quad \text{MJ/MVA} \quad (2.11)$$

Dimana S_{mach} adalah rating 3 phasa dari mesin dalam MVA. Dengan menyelesaikan persamaan untuk mendapatkan nilai M pada persamaan (2.11), didapatkan :

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \quad \text{MJ/mech rad} \quad (2.12)$$

Dengan mensubstitusikan M pada persamaan (2.12) dengan M dipersamaan (2.9) , dapat diperoleh :

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mach}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}} \quad (2.13)$$

Satuan ω_{sm} adalah mechanical radians per second dan δ_m memiliki satuan *mechanical radians* pada persamaan (2.13), untuk lebih mudah perhitungan persamaan (2.13) dijadikan menjadi per unit sehingga dapat diperoleh :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{per unit} \quad (2.14)$$

Dengan $\omega_s = 2\pi f$, maka persamaan (2.13) menjadi,

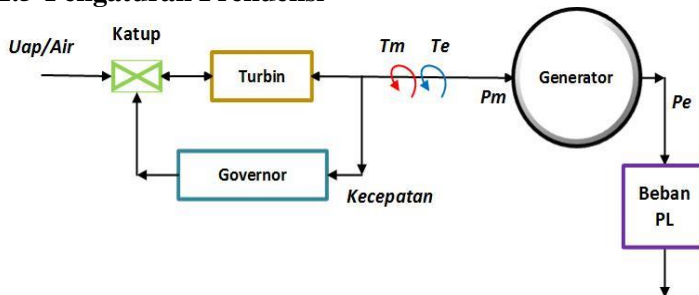
$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.15)$$

Saat δ dalam *electrical radians*,

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.16)$$

Saat δ dalam *electrical degrees*. Persamaan (2.16), menjelaskan *swing equation* mesin berupa persamaan dasar yang mengatur dinamika rotasi dari mesin sinkron pada studi stabilitas.

2.5 Pengaturan Frekuensi



Gambar 2.4 Blok Diagram Konsep Dasar Speed Governing

Konsep dasar speed governing dapat diilustrasikan pada gambar 2.3 :

T_m = torsi mekanik

P_m = daya mekanik

T_e = torsi elektrik

P_e = daya elektrik

P_L = Daya beban

Saat ada perubahan beban, terjadi perubahan torsi elektrik (T_e) pada generator secara instan. Hal ini menyebabkan perbedaan antara torsi mekanik (T_m) dan torsi elektrik (T_e) yang menyebabkan perbedaan kecepatan [2].

Daya aktif mempunyai hubungan erat dengan nominal frekuensi pada sistem. *Supply* daya aktif sistem harus sesuai dengan kebutuhan agar frekuensi tetap dalam batas yang aman untuk beroperasi. Penyesuaian daya aktif ini dilakukan dengan mengatur kopel mekanis untuk memutar generator, yang berhubungan dengan pengaturan pemberian daya mekanis ke turbin. Pengaturan pemberian bahan bakar ini dilakukan oleh governor. Governor akan mengurangi kapasitas bahan bakar ketika frekuensi naik dari nominalnya, dan menambah kapasitas bahan bakar ketika frekuensi turun dari nominalnya [4].

Mode operasi speed governor dibagi menjadi mode droop dan mode isochronous. Mode droop governor sudah memiliki *set point* daya mekanik yang besarnya sesuai dengan rating generator atau menurut kebutuhan. Dengan adanya *fixed setting*, nilai *output* daya listrik generator akan tetap sehingga perubahan beban tidak mempengaruhi putaran turbin [7]. Pada mode isochronous *set point* putaran governor ditentukan berdasarkan kebutuhan daya pada sistem saat itu secara *real time*. Governor akan menyesuaikan nilai *output* daya mekanik turbin agar sesuai dengan kebutuhan daya listrik. Caranya dengan mengatur governor berdasarkan *logic control* dari pabrikan generator. Mode ini dapat menjaga frekuensi sistem tetap berada dalam batas yang diizinkan sehingga generator tidak mengalami *loss of synchronization*.

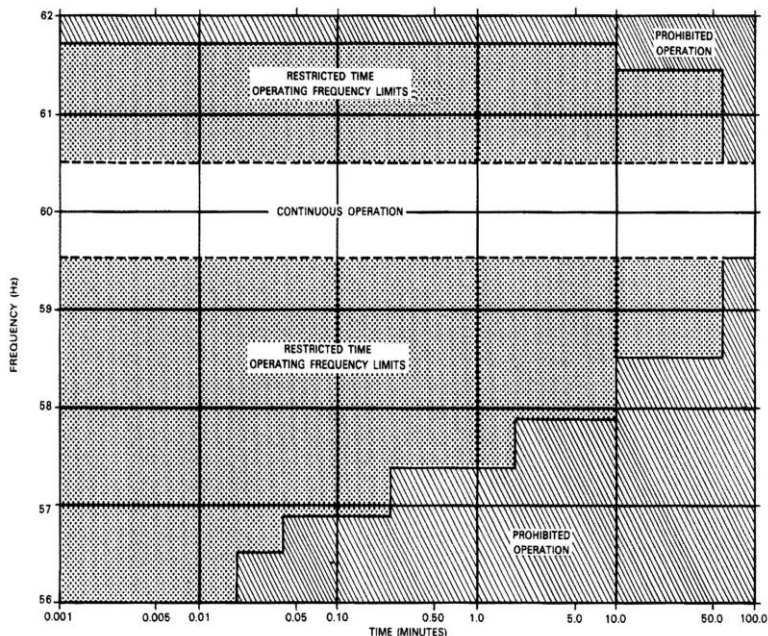
2.6 Standar yang berkaitan dengan Kestabilan Transien

Terdapat beberapa standar yang perlu diperhatikan ketika melakukan analisa kestabilan transien karena sangat berkaitan dengan kestabilan pada sistem tenaga listrik.

2.6.1 Standar Frekuensi

Standart yang digunakan untuk menentukan operasi frekuensi yang diizinkan pada steam turbin generator adalah IEEE Std.106-2003. IEEE Std.106-2003 menggunakan frekuensi 60 Hz. Namun dalam penelitian tugas akhir kali ini menggunakan frekuensi 50 Hz. Oleh karena itu perlu mengubah satuan dalam bentuk % agar dapat digunakan untuk frekuensi 50 Hz. Batas frekuensi maksimal ketika terjadi gangguan transien 61.7

Hz. Untuk sistem dengan frekuensi 50 Hz, maka $(61.7/60) \times 100\% = 103\%$. Frekuensi diharapkan tidak sampai menyentuh 103% saat *steady state*. Operasi frekuensi yang diijinkan dapat dilihat pada gambar 2.4 [8]:



Gambar 2.5 Standar Frekuensi untuk *Steam Turbin Generator* (IEEE Std C37.106-2003)

Pada gambar 2.5 terdapat 3 daerah operasi untuk *steam turbin generator*, yakni:

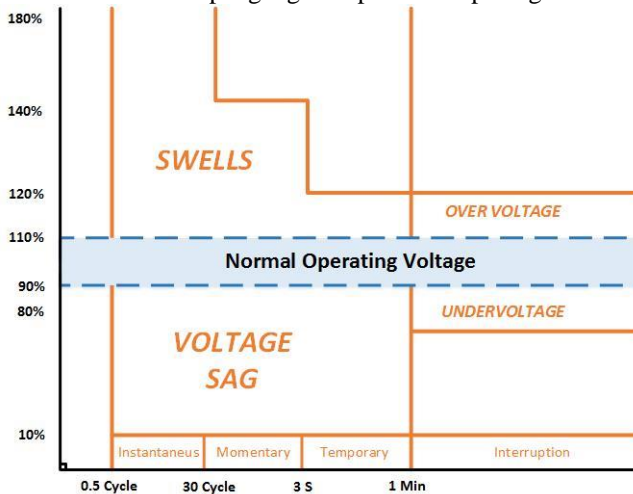
1. *Restricted time operating frequency limits* merupakan daerah frekuensi yang masih diijinkan namun hanya bersifat sementara (tergantung besar frekuensi dan waktu). Semakin besar penurunan frekuensinya maka semakin pendek waktu yang diijinkan frekuensi pada kondisi tersebut.
2. *Prohibited operation* merupakan daerah frekuensi terlarang, sehingga frekuensi tidak diijinkan mencapai daerah tersebut.
3. *Continuous operation* merupakan daerah frekuensi normal.

2.6.2 Standar Tegangan

Dalam standart tegangan dipakai 2 standart. Ketika tegangan sistem sudah stabil maka standart tegangan yang dipakai adalah standart PLN yaitu:

- 500 kV + 5%, -5%
- 150 kV + 5%, -10%
- 70 kV + 5%, -10%
- 20 kV + 5%, -10%

Sedangkan untuk kedip tegangan dipakai standart IEEE 1159-195. Untuk standart kedip tegangan dapat dilihat pada gambar 2.5



Gambar 2.6 Definisi *Voltage Magnitude Event* berdasarkan Standar IEEE 1159-1995

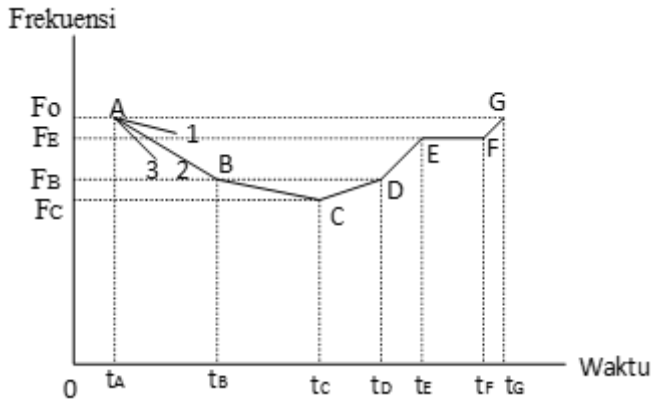
Pada gambar 2.6 menunjukkan standart IEEE 1159-195. Kedip tegangan yang diijinkan hanya 10 %. Untuk instantaneous selama 30 cycle, untuk momentary 3 detik, dan untuk temporary 1 menit.

2.7 Pelepasan Beban

Salah satu cara untuk mempertahankan kestabilan sistem tenaga adalah dengan menggunakan metode pelepasan beban. Lepasnya generator dari sistem merupakan contoh kasus yang mengakibatkan daya yang tersedia tidak mampu memenuhi kebutuhan beban, sehingga melepas beban perlu dilakukan untuk menjaga sistem agar tidak mati total. Hal ini memberikan indikasi dengan adanya penurunan frekuensi

system hingga melebihi batas standar kondisi yang diijinkan untuk beroperasi.

Ilustrasi keadaan ketika kehilangan suplai daya pada gambar 2.6.



Gambar 2.7 Perubahan Frekuensi Sebagai Fungsi Waktu dengan Adanya Pelepasan Beban

Pada gambar 2.7 dapat dijelaskan tentang respon frekuensi akibat kehilangan suplai daya. Ketika mencapai t_A diartikan sebagai system mulai kehilangan daya. Garis 1, 2, dan 3 menunjukkan respon frekuensi ketika kehilangan suplai daya. Kecuraman penurunan frekuensi pada garis 1,2, dan 3 bergantung pada besar pembangkitan yang hilang. Semakin curam garis, maka semakin besar daya suplai yang hilang. Penurunan frekuensi juga dipengaruhi oleh besar inertia sistem. Semakin lambat penurunan frekuensinya maka semakin besar inertia sistem. Huruf pada gambar 2.7 dijelaskan sebagai berikut:

- A. Dimisalkan penurunan frekuensi terjadi pada garis 2. Dari garis 2 frekuensi turun secara drastis. Ketika frekuensi mencapai F_B maka akan dilakukan *Load Shedding* tahap 1 (titik B). Dengan adanya *Load Shedding* tahap 1 membuat penurunan frekuensi turun secara melambat.
- B. Ketika terjadi penurunan frekuensi hingga F_C maka akan dilakukan *Load Shedding* tahap 2 (titik C). Dengan adanya *Load Shedding* tahap 2 frekuensi sistem menjadi naik. Namun kenaikan frekuensi masih terlalu lambat sehingga untuk mencapai frekuensi normal membutuhkan waktu yang lama.

- C. Ketika frekuensi mencapai frekuensi F_B perlu dilakukan *Load Shedding* tahap 3 (titik D). Dengan adanya *Load Shedding* tahap 3 untuk mencapai frekuensi normal dapat dilakukan sedikit lebih cepat namun kecepatannya kenaikan masih terlalu lambat untuk mencapai frekuensi normal.
- D. Sehingga ketika mencapai frekuensi F_E dilakukan *Load Shedding* tahap 4 (titik E). Dengan adanya *Load Shedding* tahap 4 membuat frekuensi sistem menjadi stabil.
- E. Namun kestabilan frekuensi sistem masih dibawah standart yang ada sehingga ketika $t=t_F$ dilakukan *Load Shedding* tahap 5 (titik F). Akibat *Load Shedding* tahap 5 membuat frekuensi sistem kembali ke frekuensi normal.

Ada dua macam mekanisme pelepasan beban yaitu pelepasan beban secara manual dan pelepasan beban secara otomatis.

2.7.1 Pelepasan Beban secara Manual

Untuk pelepasan secara manual dipakai dalam keadaan tidak begitu genting seperti turunnya tegangan. Pelepasan beban secara manual biasanya dilakukan ketika ada starting motor besar yang dapat membuat sistem tidak stabil. Sehingga sebelum dilakukan motor starting perlu dilakukan pelepasan beban secara manual. Atau ketika tiba-tiba ada penambahan beban yang melebihi suplai daya dari generator. Hal ini menyebabkan turunya frekuensi dan tegangan sistem. Jika turunnya tegangan dan frekuensi ini dianggap berbahaya, maka operator secara manual akan mengambil inisiatif untuk melepaskan sebagian beban agar kestabilan sistem tetap terjaga. Dengan adanya pelepasan beban tersebut diharapkan perubahan tegangan atau frekuensi tidak berakibat fatal terhadap beban-beban yang sensitif terhadap perubahan tegangan atau frekuensi. Kelebihan dari cara ini yaitu tidak membutuhkan biaya alat-alat otomatis yang mahal. Namun kekurangannya adalah operator pemutus harus handal dan sigap dalam mengatasi permasalahan. Bila tidak, dapat menyebabkan sistem menjadi tidak stabil.

2.7.2 Pelepasan Beban secara Otomatis

Pelepasan beban secara otomatis menggunakan relay under frequency. Relay under frequency bekerja berdasarkan besar penurunan frekuensi pada sistem. Perencanaan dan setting relay under frequency dilakukan dalam kondisi beban berlebih atau disebabkan lepasnya salah satu generator dari sistem sehingga generator yang lain menanggung

beban tambahan. Dengan kondisi beban berlebih ini, frekuensi sistem akan menurun. Jika kondisi ini berlangsung terus menerus, maka generator akan mengalami overload sehingga diperlukan mekanisme load shedding. Ketika terjadi gangguan yang mengakibatkan kondisi beban berlebih maka beban akan terlepas berdasarkan sinyal yang dikirim oleh relay under frequency (81-U). Pelepasan beban tidak dilakukan secara langsung sesuai dengan nominal beban berlebih, namun dilakukan secara bertahap. Hal ini untuk menghindari terjadinya overvoltage. Rele underfrequency akan bekerja sesuai dengan setting yang telah ditentukan untuk memutus beban secara bertahap sesuai dengan penurunan frekuensi yang terjadi. Rele underfrequency terpasang pada substation-substation dan dihubungkan dengan pemutus daya pada feeder yang ingin dilepas.

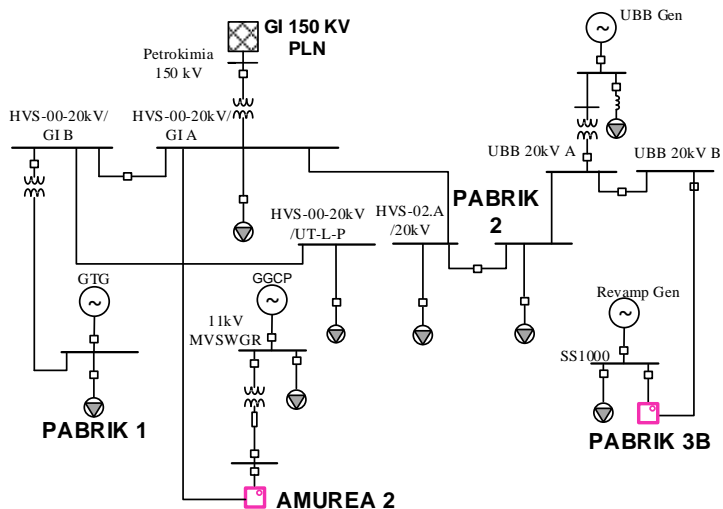
Selain itu pelepasan beban otomatis dapat menggunakan *Lockout Relay* atau biasa disebut pelepasan beban menggunakan status. Sebagai contoh, pada kasus *generator outage* pada sistem dengan skala yang besar, untuk menanggulangi penurunan level frekuensi dengan cepat ditetapkan sebuah status pada *lockout relay* dimana beban akan dilepas secara bersamaan sehingga mengembalikan kestabilan sistem.

BAB 3

SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA GRESIK

3.1 Sistem Kelistrikan di PT. Petrokimia Gresik

PT. Petrokimia memiliki 4 unit pembangkit aktif utama antara lain pembangkit GGCP dengan daya mampu 23 MW, UBB dengan daya mampu 15 MW, Revamp Gen dengan daya mampu 12 MW, dan GTG dengan daya mampu 24 MW. PT. Petrokimia Gresik juga terintegrasi dengan PLN dengan daya kontrak sebesar 17 MW. Sistem kelistrikannya dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik

3.2 Data Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik

Jumlah total pembangkitan, pembebanan, dan *demand* dapat dilihat pada tabel 3.1 :

Tabel 3.1 Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan, dan *Demand*

<i>Keterangan</i>	MW	MVAr	MVA	%PF
<i>Source (swing bus)</i>	2.5	10.8	11.085	97.4 Lag
<i>Source (non swingbus)</i>	74	31.269	80.33	92.12 Lag
<i>Total Demand</i>	75.066	41.63	85.836	87.452 Lag
<i>Total Motor Load</i>	63.353	34.51	72.14	87.819 Lag
<i>Total Static Load</i>	11.71	7.12	13.70	85.47 Lag
<i>Apparent Losses</i>	1.458	6.465		

Jumlah total *demand* pada PT. Petrokimia Gresik adalah 76.446 MW, 41.204 Mvar, dan 87.547 MVA.

3.2.1 Generator PT. Petrokimia Gresik

Tabel 3.2 Data Spesifikasi Generator

Spesifikasi	GGCP	UBB	Revamp Gen	GTG
Rating	26.8 MW	32 MW	17.5 MW	33 MW
Daya mampu	22 MW	15 MW	12 MW	24 MW
Tegangan	11 kV	6 kV	6 kV	11.5 kV
frekuensi	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
<i>Speed</i>	1500	3000	3000	3000
PF	85%	80%	85%	80%
FLA	1655 A	3849 A	1981 A	2071 A
<i>Type Exciter</i>	DC1	AC5A	ST1	DC1
<i>Type Governor</i>	GT	505	ST	GGOV3
H	1.446	2	1.7	2
<i>Damping</i>	0	0	0	0

Tabel 3.3 Data Spesifikasi Generator (lanjutan)

Spesifikasi	GGCP	UBB	Revamp Gen	GTG
<i>Direct axis synchronous reactance (X_d)</i>	198.2	155	155	155
<i>Direct axis transient reactance (X_d')</i>	24.5	28	28	28
<i>Direct axis sub-transient reactance (X_d'')</i>	17.3	19	19	19
<i>Negative sequence reactance (X_2)</i>	17.9	18	18	18
<i>Zero sequence reactance (X_0)</i>	11.2	7	7	7
<i>Quadrature axis synchronous reactance (X_q)</i>	102.1	155	155	155
<i>Quadrature axis transient reactance (X_q')</i>	102.1	65	65	65
<i>Quadrature axis sub-transient reactance (X_q'')</i>	24.2	19	19	19
<i>Transient direct axis open circuit transient ($T'do$)</i>	7.58	6.5	6.5	6.5
<i>Transient direct axis open circuit transient ($T''do$)</i>	0.046	0.035	0.035	0.035

3.2.2 Transformator PT. Petrokimia Gresik

Sistem kelistrikan di PT. Petrokimia Gresik menggunakan sistem distribusi semi radial. Hal ini karena terdapat pabrik pada PT. Petrokimia Gresik yang mendapat suplai lebih dari satu feeder. Sedangkan pabrik 3A tidak terinterkoneksi dengan sistem lainnya dan memiliki sistem pembangkitan sendiri. Untuk distribusi daya PT. Petrokimia Gresik memiliki beberapa level tegangan yaitu 20 kV, 11.5 kV, 11 kV, 6.3 kV, 6 kV, dan 0.4 kV. Untuk menghubungkan sistem yang memiliki level tegangan yang berbeda, PT. Petrokimia Gresik menggunakan trafo step up dan step down. Data transformator yang digunakan PT. Petrokimia ditunjukkan pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Data Transformator Distribusi di PT. Petrokimia Gresik

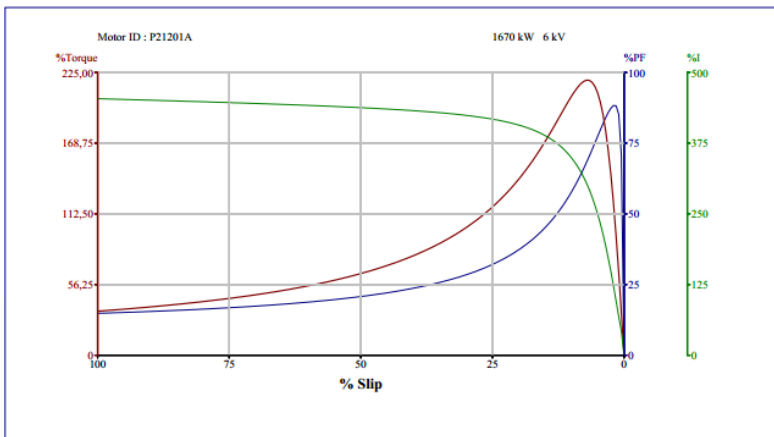
No	ID	MVA	kV	%Z	X/R	Hubungan
1	IT	30	11/20	11	1.5	delta/wye
2	TRAFO UBB	35	6/20	10	27.3	delta/wye
3	TR PLN	25	150/20	10	23.7	delta/wye
4	TR GI	25	20/11.5	8	23.7	delta/wye
5	MAIN01	8	20/6	8	14.23	delta/wye
6	TR1	12.5	20/6.3	7.5	13	delta/wye
7	TR2	12.5	20/6.3	7.5	13	delta/wye
8	TR-2281 A	25	11.5/6	8	23.7	delta/wye
9	TR-2281 B	25	11.5/6	8	23.7	delta/wye
10	09-TR-101	5	20/6	7	12.14	delta/wye
11	TR 11	16	20/6	8.33	14.23	delta/wye
12	TR12	8	20/6	8	14.23	delta/wye
13	TR 13	8	20/6	8.33	18.6	delta/wye
14	TR 14	8	20/6	8.33	14.23	delta/wye
15	TR 15	16	20/6	8.33	18.6	delta/wye
16	32-TR-31	8	20/6	8	15.5	delta/wye
17	09-TR-101	5	20/6	7	12.14	delta/wye
18	TR9	3	6.3/0.4	7	10	delta/wye
19	TR10	3	6.3/0.4	7	10	delta/wye
20	TR HVS- 2210	2.5	20/6	6	10.67	delta/wye
21	TR7	1.6	6/0.4	5.5	10	delta/wye

3.2.3 Motor Terbesar PT. Petrokimia Gresik

Pada analisa kestabilan transient untuk kasus motor *starting*, beban motor terbesar pabrik perlu di perhitungkan. Motor terbesar memiliki rating tegangan 6.3 kV dengan kapasitas 1670 kW. Karakteristik motor terbesar dapat dilihat pada tabel 3.5 dan gambar 3.2:

Tabel 3.5 Data Spesifikasi Motor P21201A dalam kondisi belum beroperasi

Karakteristik	Setting
LRC	650%
PF	12.47%
1/2 cy Xsc	15.385%
1.5-4 cy Xsc	23.077%
X/R	7.96



Gambar 3.2 Karakteristik motor P21201A

3.2.4 Data Kabel PT. Petrokimia Gresik

PT. Petrokimia Gresik memiliki komponen berupa kabel untuk menghubungkan antara penyulang dan beban yang ada. Tabel 3.6 berikut merupakan data-data kabel yang terdapat pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik :

Tabel 3.6 Data kabel PT. Petrokimia Gresik

ID	Tegangan (kV)	Panjang (m) / diameter (mm ²)	Isolasi	Manufaktur	Tipe
C IT	20	55/150	XLPE	Caled BS6622	CU
Cable 183	20	200/150	XLPE	Heesung	CU
Cable 181	20	2000/150	XLPE	Heesung	CU
Cable 45	20	45/150	XLPE	Heesung	CU
Cable 17	20	700/185	Rubber	ICEA	CU
Cable 4	20	700/185	Rubber	ICEA	CU
Cable6	20	450/185	Rubber	ICEA	CU
Cable19	20	450/185	Rubber	ICEA	CU
18/20-3x2	20	150/185	XLPE	Caled BS6622	CU
18/20-3x185	20	150/185	XLPE	Caled BS6622	CU
Cable2	20	1000/150	Rubber	ICEA	CU
Cable2-1	20	1000/150	Rubber	ICEA	CU
Cable23	11,5	300/300	Rubber	ICEA	CU
Cable1	11,5	300/300	Rubber	ICEA	CU
Cable125	6,3	50/95	XLPE	Heesung	CU
Cable46	0,4	155/6	XLPE	Caled BS5467	CU
E21101C-MP	6,3	405/35	XLPE	Heesung	CU
E21101D-MP	6,3	424/35	XLPE	Heesung	CU
E21101E-MP	6,3	441/35	XLPE	Heesung	CU
E21101F-MP	6,3	461/35	XLPE	Heesung	CU
Cable131	6,3	50/95	XLPE	Heesung	CU
Cable147	6	80/95	XLPE	Heesung	CU
DP-WWTP-LP	0,4	535/240	XLPE	Caled BS546	CU

Tabel 3.7 Data kabel PT. Petrokimia Gresik (lanjutan)

ID	Tegangan (kV)	Panjang (m) / diameter (mm)	Isolasi	Manufaktur	Tipe
2 (3X150)	6	200/150	EPR	BS6622	CU
342- TR9-MP	6,3	431/240	XLPE	Heesung	CU
C ES1	0,4	100/35	XLPE	Caled BS5467	CU
C ES2	0,4	100/16	XLPE	Caled BS5467	CU
C ES3	0,4	100/240	XLPE	Caled BS5467	CU
C ES4	0,4	100/50	XLPE	Caled BS5467	CU
C ES7	0,4	100/35	XLPE	Caled BS5467	CU
C ES8	0,4	100/25	XLPE	Caled BS5467	CU
C MV1	6	320/50	XLPE	BS6622	CU
C MV2	6	220/50	XLPE	BS6622	CU
C MV5	6	130/50	XLPE	BS6622	CU
342- TR9-MP	6,3	431/240	XLPE	Heesung	CU
342- TR10- MP	6,3	436/240	XLPE	Heesung	CU
342- TR11- MP	6,3	75/95	XLPE	Heesung	CU
C AT1	11	55/70	XLPE	BS6622	CU
C AT2	11	55/150	XLPE	BS6622	CU
C LV2	0,4	100/240	XLPE	Caled BS5467	CU
C LV3	0,4	100/16	XLPE	Caled BS5467	CU

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB 4

ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. PETROKIMIA GRESIK

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan

Gambar di lampiran merupakan hasil pemodelan *Single Line Diagram* PT. Petrokimia Gresik berdasarkan data-data yang ada. Kemudian dilakukan simulasi dan analisis kestabilan transien dengan studi kasus yang telah direncanakan dengan ETAP 12.6. Dengan memodelkan kemungkinan gangguan yang muncul diharapkan terdapat sebuah tindakan lebih lanjut agar sistem tetap dalam kondisi stabil untuk beroperasi. Pada tugas akhir ini analisis dilakukan ketika terjadi lepasnya generator (*generator outage*), gangguan hubung singkat (*short circuit*) dan penyalan motor (*motor strating*) berkapasitas besar .

4.2 Studi Kasus Kestabilan Transien

Pada simulasi ini dilakukan analisis kestabilan transient dengan beberapa kasus yang mungkin terjadi dan mempengaruhi kestabilan sistem. Studi kasus gangguan yang digunakan pada simulasi ini antara lain:

1. *Generator outage*: Pada kasus ini terdapat satu atau lebih generator yang lepas ketika sistem sedang berjalan. Konfigurasi sistem operasinya antara lain:
 - a. Pola Operasi 1 : Kondisi operasi normal pembangkitan PT. Petrokimia Gresik. Generator GGCP, UBB, Revamp Gen, GTG, serta *utility* PLN dalam kondisi aktif. Daya yang dibangkitkan 76.43 MW.
 - b. Pola Operasi 2 : Kondisi operasi ketika 1 generator tidak aktif yaitu GTG. Daya yang dibangkitkan sebesar 65.92 MW.
 - c. Pola Operasi 3 : Kondisi operasi ketika 1 generator tidak aktif yaitu GGCP. Daya yang dibangkitkan sebesar 67.257 MW.
2. *Short circuit*: Pada kasus ini terjadi gangguan hubung singkat pada bus LV2 SWGR, bus PS 2281 A-1 dan bus UBB 20kV B.
3. *Motor starting*: Pada kasus ini terjadi *starting* motor berkapasitas besar yaitu motor P21201A berkapasitas 1670 kW. Simulasinya dengan pola operasi 2 ketika pembangkit GTG sedang dalam kondisi tidak aktif.

Tabel 4.1. Studi Kasus Kestabilan Transien

No	Kasus	Pola Operasi	Keterangan
1	Revamp Gen <i>trip</i>	1	Generator Revamp Gen lepas dari sistem
	Revamp Gen <i>trip</i> + LS	1	Generator Revamp Gen lepas dari sistem dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i>
2	GTG <i>off</i> + Utility <i>trip</i>	2	Generator GTG tidak beroperasi ketika Utility PLN lepas dari sistem
	GTG <i>off</i> + Utility <i>trip</i> + LS	2	Generator GTG tidak beroperasi ketika Utility PLN lepas dari sistem dilanjutkan dengan <i>load shedding</i>
3	GTG <i>off</i> + Revamp Gen <i>trip</i>	2	Generator GTG tidak Beroperasi ketika generator Revamp Gen lepas dari sistem
	GTG <i>off</i> + Revamp Gen <i>trip</i> + LS	2	Generator GTG tidak Beroperasi ketika generator Revamp Gen Lepas dari sistem dilanjutkan dengan <i>load shedding</i>
4	GTG <i>off</i> + GGCP <i>trip</i>	2	Generator GTG tidak Beroperasi ketika generator GGCP Lepas dari sistem
	GTG <i>off</i> + GGCP <i>trip</i> + LS	2	Generator GTG tidak Beroperasi ketika generator GGCP Lepas dari sistem dilanjutkan dengan <i>load shedding</i>
5	GTG <i>off</i> + UBB <i>trip</i>	2	Generator GTG tidak Beroperasi ketika generator UBB Lepas dari sistem
	GTG <i>off</i> + UBB <i>trip</i> + LS	2	Generator GTG tidak Beroperasi ketika generator UBB Lepas dari sistem dilanjutkan dengan <i>load shedding</i>

Tabel 4.2. Studi Kasus Kestabilan Transien (lanjutan)

6	GGCP <i>off</i> + Utility <i>trip</i>	3	Generator GGCP tidak beroperasi ketika Utility PLN lepas dari sistem
	GGCP <i>off</i> + Utility <i>trip</i> + LS	3	Generator GGCP tidak beroperasi ketika Utility PLN lepas dari sistem dilanjutkan dengan <i>load shedding</i>
7	GGCP <i>off</i> + Revamp Gen <i>trip</i>	3	Generator GGCP tidak Beroperasi ketika generator Revamp Gen Lepas dari sistem
	GGCP <i>off</i> + Revamp Gen <i>trip</i> + LS	3	Generator GGCP tidak Beroperasi ketika generator Revamp Gen Lepas dari sistem dilanjutkan dengan <i>load shedding</i>
8	GGCP <i>off</i> + GTG <i>trip</i>	3	Generator GGCP tidak Beroperasi ketika generator GTG Lepas dari sistem
	GGCP <i>off</i> + GTG <i>trip</i> + LS	3	Generator GGCP tidak Beroperasi ketika generator GTG Lepas dari sistem dilanjutkan dengan <i>load shedding</i>
9	SC 0.4kV	1	Gangguan hubung singkat di bus LV2 SWGR dilanjutkan dengan CB open setelah terjadi gangguan
10	SC 6kV	1	Gangguan hubung singkat di bus PS-2281 A-1 dilanjutkan dengan CB open setelah terjadi gangguan
12	SC 20kV	1	Gangguan hubung singkat di bus UBB 20kV B dilanjutkan dengan CB open setelah terjadi gangguan
13	MS P21201A	2	<i>Motor starting</i> (PS21201A) (1670 kW)

Untuk studi kasus gangguan generator *outage*, dan *short circuit* bus yang digunakan sebagai indikasi kestabilan transien sistem yaitu:

1. Bus 11kV MVSWGR sebagai bus yang mewakili tegangan 11 kV.
2. Bus SS1000 sebagai bus yang mewakili tegangan 6 kV.

Sedangkan studi kasus gangguan motor *starting*, bus yang digunakan sebagai indikasi kestabilan transien adalah bus Bus21B

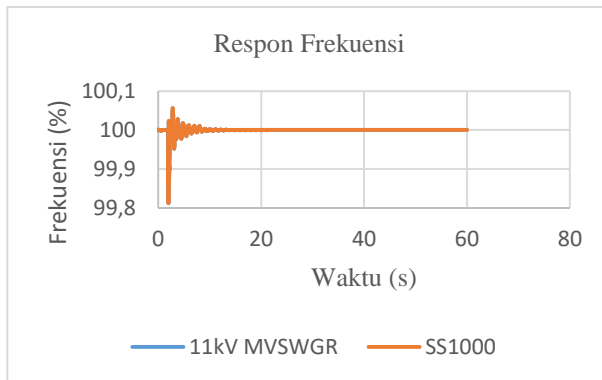
bertegangan 6.3 kV yang terhubung langsung dengan motor yang akan dinyalakan.

4.3 Hasil Simulasi Kestabilan Transien dan Mekanisme *Load Shedding*

Pada sub bab 4.3 ini akan di jelaskan mengenai hasil kestabilan transien meliputi respon frekuensi bus, sudut rotor generator dan tegangan bus akibat kasus yang sudah direncanakan pada sub bab 4.2.

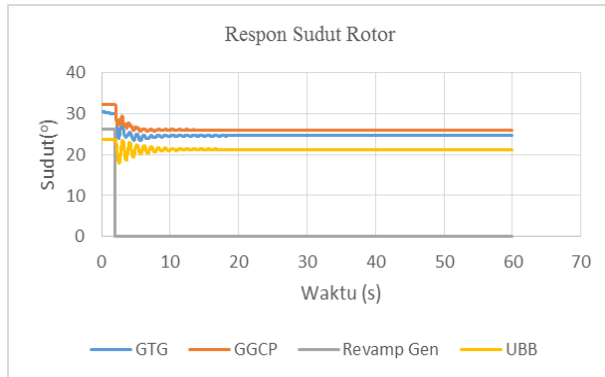
4.3.1 Studi Kasus Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini menunjukkan hasil simulasi generator Revamp Gen lepas dengan operasi pembangkit model 1. Generator ini mempunyai rating 17.5 MW. Namun dalam pengoprasiannya daya maksimal yang dikeluarkan 12 MW. Dalam kasus ini generator disimulasikan lepas ketika 2 detik dengan lama simulasi 60 detik.



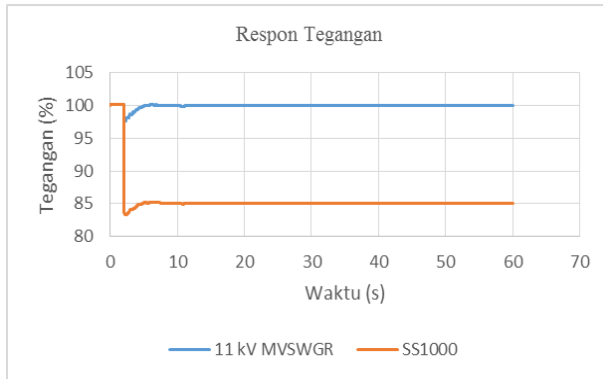
Gambar 4.1 Respon Frekuensi Bus Ketika Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem

Pada gambar 4.1 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami osilasi. Frekuensi pada masing masing bus turun hingga 99.8114% dari frekuensi awal kemudian stabil pada 100% hingga akhir simulasi. Dalam studi kasus tersebut respon frekuensi sesuai dengan standar yang diizinkan untuk beroperasi.



Gambar 4.2 Respon Sudut Rotor Ketika Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem

Pada gambar 4.2 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Sebelum terjadi gangguan sudut rotor GTG sebesar 43.85° , GGCP sebesar 29.06° , Revamp Gen sebesar 25.45° , UBB sebesar 39.8° . Ketika terjadi gangguan, sudut rotor GTG mengalami osilasi dengan penurunan terendah 34.32° . Sedangkan kenaikan tertinggi 43.91° kemudian menurun hingga 35.68° . Pada generator GGCP, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 34.23° . Sedangkan kenaikan tertinggi 29.13° kemudian menurun hingga 23.37° . Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 34.58° . Sedangkan kenaikan tertinggi 39.84° kemudian menurun hingga 38.35° . Pada kasus ini terjadi penurunan dan kenaikan seketika pada sudut rotor generator. Namun sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



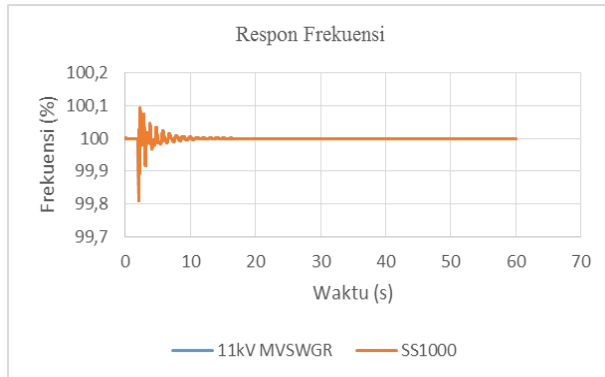
Gambar 4.3 Respon Tegangan Bus ketika Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem

Pada gambar 4.3 menunjukkan terjadi penurunan pada masing masing level tegangan. Tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan ketika 2 detik. Bus SS1000 mengalami penurunan seketika hingga 81.72% pada detik ke 2.401 dan berada pada 83.48% hingga akhir simulasi. Sedangkan Bus 11KV MVSWGR mengalami penurunan seketika 97.32% pada detik ke 2.241 kemudian naik 100.248% dan turun perlahan hingga 99.97%. Turunnya tegangan disebabkan beban pada sistem tidak tersuplai secara penuh.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi dan sudut rotor masih dalam batas aman. Namun respon tegangannya belum memenuhi standar. Maka untuk mempertahankan peralatan dan memperbaiki respon sistem perlu dilakukan mekanisme *Load Shedding*.

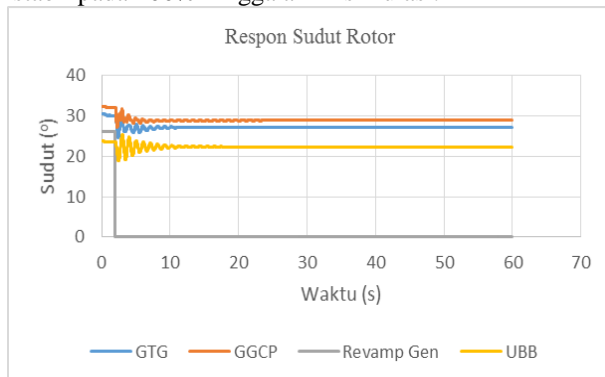
4.3.2 Studi Kasus ketika Generator Revamp Gen Lepas ($t=2s$) Dilanjutkan Dengan Mekanisme *Load Shedding*

Untuk mempertahankan frekuensi dan tegangan sistem maka dilakukan mekanisme *Load Shedding* setelah generator Revamp Gen lepas dari sistem. Pada kasus ini gangguan terjadi pada detik ke 2 kemudian detik ke 0.2 setelah terjadinya gangguan disimulasikan pelepasan beban sebesar 5.5 MW.



Gambar 4.4 Respon Frekuensi Bus Ketika Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem Dilanjutkan Dengan Mekanisme *Load Shedding*

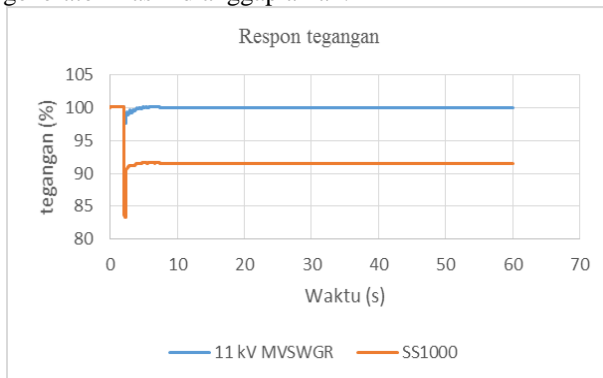
Pada gambar 4.4 dapat dilihat respon frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami penurunan. Akibat adanya mekanisme *Load Shedding* menyebabkan frekuensi turun menjadi 99.809% dan kembali stabil pada 100% hingga akhir simulasi.



Gambar 4.5 Respon Sudut Rotor ketika Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem Dilanjutkan Dengan Mekanisme *Load Shedding*

Pada gambar 4.5 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Ketika dilakukan load shedding, sudut rotor GTG mengalami osilasi dengan penurunan terendah 24.67°. Sedangkan kenaikan tertinggi 30.49° kemudian stabil pada posisi 27.12°. Pada generator GGCP, sudut

rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 27.23° . Sedangkan kenaikan tertinggi 32.26° kemudian stabil pada posisi 28.83° . Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 18.79° . Sedangkan kenaikan tertinggi 25.28° kemudian stabil pada posisi 22.36° . Pada kasus ini terjadi penurunan dan kenaikan seketika pada sudut rotor generator. Namun sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



Gambar 4.6 Respon Tegangan Bus ketika Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem Dilanjutkan dengan Mekanisme *Load Shedding*

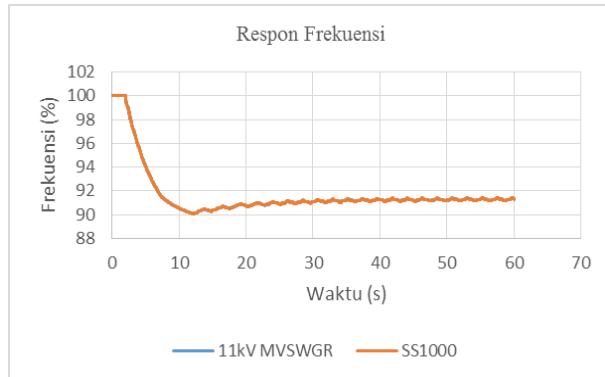
Pada gambar 4.6 menunjukkan respon tegangan ketika Generator A-001B Lepas dari Sistem Dilanjutkan dengan Mekanisme *Load Shedding*. Seperti yang terlihat pada bus 11kV MVSWGR mengalami penurunan terendah 97.587% pada detik ke 2.241 kemudian naik 100.23% selanjutnya stabil hingga 100.03%. Bus SS1000 mengalami penurunan terendah 81.74% pada detik ke 2.3 kemudian kenaikan tertinggi 100.13% selanjutnya stabil hingga 90.13%.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, sudut rotor, dan respon tegangan kembali stabil dan memenuhi standar yang diizinkan

4.3.3 Studi Kasus GTG off dan Utility Lepas dari Sistem ($t=2s$)

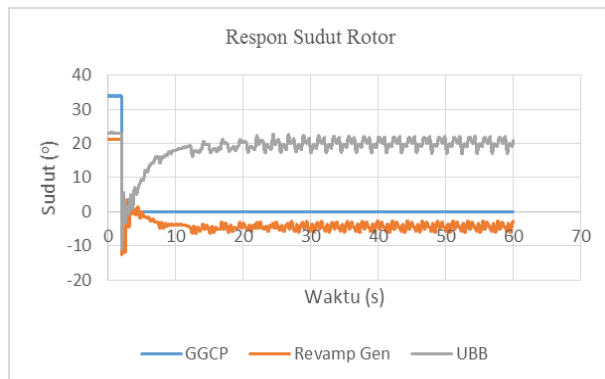
Pada studi kasus ini menunjukkan hasil simulasi sumber dari PLN mengalami gangguan dengan menggunakan pola operasi pembangkitan 2. Pada pola operasi ini generator GTG sedang dalam kondisi tidak aktif dan sumber dari PLN memberikan daya sebesar 17 MW dan semua

generator beroperasi dengan daya maksimum untuk memenuhi kebutuhan beban sistem.



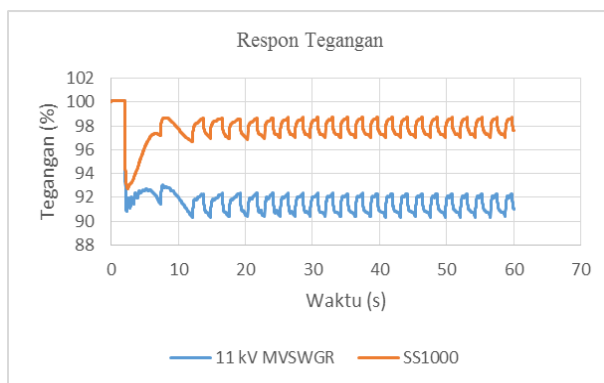
Gambar 4.7 Respon Frekuensi Bus ketika *Utility* PLN Lepas dari Sistem

Pada gambar 4.7 menunjukkan bahwa respon frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami penurunan. Respon frekuensinya mengalami penurunan tiba tiba hingga 90.065% pada detik ke 10.321 kemudian menuju 91.316% hingga akhir simulasi. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 respon frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini tidak diperbolehkan, sehingga dibutuhkan mekanisme *load shedding*.



Gambar 4.8 Respon Sudut Rotor Ketika *Utility* PLN Lepas dari Sistem

Pada gambar 4.8 menunjukkan terjadinya perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Ketika sumber dari PLN mengalami gangguan maka generator berkapasitas terbesar yang sedang aktif yaitu generator GGCP digunakan sebagai referensi. Sebelum terjadi gangguan sudut rotor GGCP sebesar 33.78° , Revamp Gen sebesar 100.05° , UBB sebesar 100.04° . Ketika terjadi gangguan, sudut rotor Revamp gen mengalami osilasi dengan penurunan terendah 92.696° . Sedangkan kenaikan tertinggi 100.11° kemudian tetap berosilasi hingga akhir simulasi. Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 81.866° . Sedangkan kenaikan tertinggi 82.547° kemudian kemudian tetap berosilasi hingga akhir simulasi. Pada kasus ini terjadi penurunan dan kenaikan seketika pada sudut rotor generator. Hingga akhir simulasi respon sudut rotor masin belum dapat stabil.



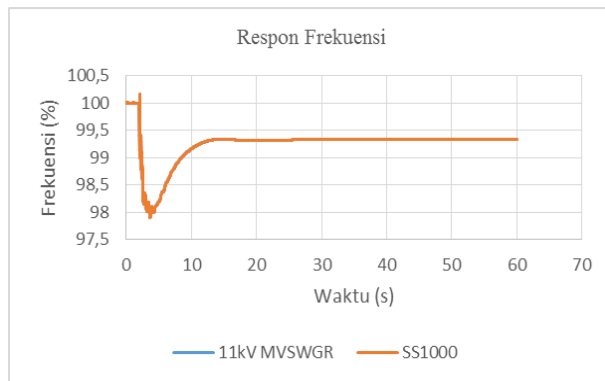
Gambar 4.9 Respon Tegangan Bus ketika *Utility* PLN Lepas dari Sistem

Pada gambar 4.9 menunjukkan terjadi penurunan pada masing masing level tegangan. Bus 11kV MVSWGR mengalami penurunan terendah 90.285% pada detik ke 12.161 kemudian berosilasi hingga akhir simulasi. Bus SS1000 mengalami penurunan seketika 92.696% pada detik ke 2.481 selanjutnya terus berosilasi hingga akhir simulasi.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor tidak dapat kembali stabil sesuai dengan standar yang diizinkan sehingga memerlukan adanya pelepasan beban untuk menjaga kestabilan pada sistem

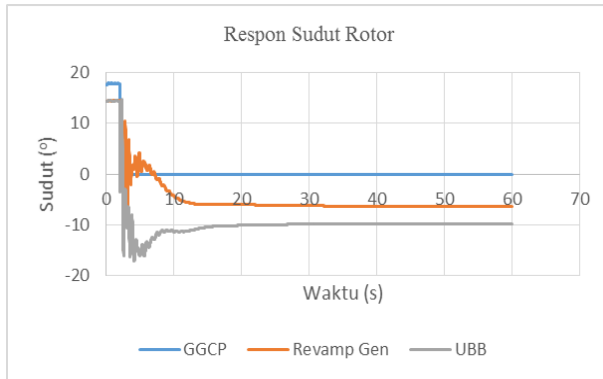
4.3.4 Studi Kasus GTG off, Utility Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan Mekanisme *Load Shedding*

Pada studi kasus ini menunjukkan hasil simulasi lepasnya sumber dari *utility* PLN dengan mekanisme *Load Shedding*. Respon frekuensi, sudut rotor, dan tegangan berada pada kondisi yang tidak diizinkan untuk beroperasi ketika mengalami gangguan. Oleh sebab itu perlu dilakukan *Load Shedding* untuk mengembalikan kestabilan sistem. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Pada detik ke 0.2 setelah terjadi gangguan, dilakukan simulasi pelepasan beban sebesar 13.4 MW dari total beban.



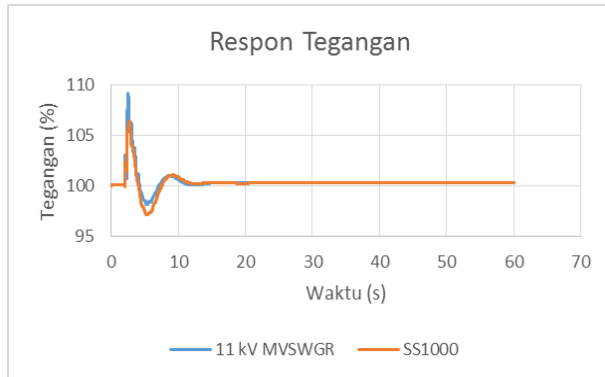
Gambar 4.10 Respon Frekuensi Bus ketika *Utility* PLN Lepas Dilanjutkan dengan *Load Shedding*

Pada gambar 4.10 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami penurunan. Frekuensinya pada masing-masing bus turun hingga 99.34% dengan penurunan frekuensi tiba tiba hingga 97.904% pada detik ke 3.641. Sehingga sistem aman karena telah memenuhi standar dari abnormal frekuensi.



Gambar 4.11 Respon Sudut Rotor Ketika *Utility* PLN Lepas Dilanjutkan dengan *Load Shedding*

Pada gambar 4.11 menunjukkan terjadinya perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Ketika sumber dari PLN mengalami gangguan maka generator berkapasitas terbesar yang sedang aktif yaitu generator GGCP digunakan sebagai referensi. Sebelum terjadi gangguan sudut rotor GGCP sebesar 17.62° , Revamp Gen sebesar 14.24° , UBB sebesar 14.24° . Ketika terjadi gangguan dan mekanisme *Load Shedding* bekerja, sudut rotor Revamp gen mengalami osilasi dengan penurunan terendah -14.86° . Sedangkan kenaikan tertinggi 14.89° kemudian stabil pada -6.32° hingga akhir simulasi. Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah -17.19° . Sedangkan kenaikan tertinggi 14.68° kemudian stabil pada -9.8° hingga akhir simulasi. Pada kasus ini terjadi penurunan dan kenaikan seketika pada sudut rotor generator. Namun sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



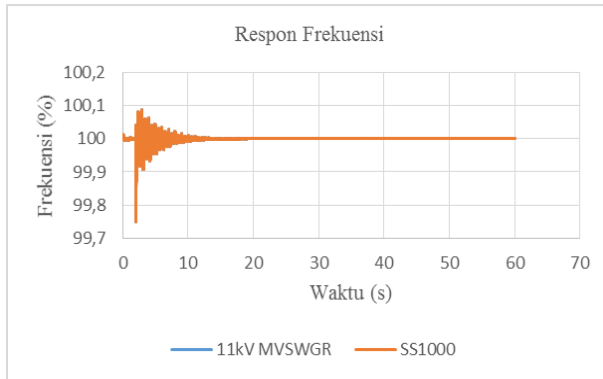
Gambar 4.12 Respon Tegangan Bus ketika *Utility PLN* Lepas Dilanjutkan dengan *Load Shedding*

Pada gambar 4.12 menunjukkan terjadi penurunan pada masing masing level tegangan. Tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan ketika 2 detik. Bus 11kV MVSWGR naik seketika 109.16% kemudian turun hingga 98.135% pada detik ke 5.341 dan stabil menjadi 100.04%. Bus SS1000 naik seketika 106.46% kemudian turun hingga 97.11% pada detik ke 5.261 dan stabil menjadi 100%. Turunnya tegangan disebabkan beban pada sistem tidak tersuplai penuh.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat kembali stabil.

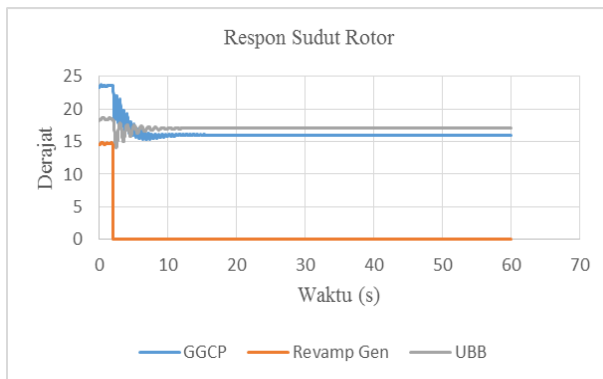
4.3.5 Studi Kasus GTG off dan Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini menunjukkan hasil simulasi generator Revamp Gen lepas dengan operasi pembangkit model 2 yaitu generator GTG sedang tidak beroperasi. Generator Revamp Gen mempunyai rating 17.5 MW. Namun dalam pengoperasiannya daya maksimal yang dikeluarkan 12 MW. Dalam kasus ini generator disimulasikan lepas pada ketika 2 detik dengan lama simulasi 60 detik.



Gambar 4.13 Respon Frekuensi Bus ketika Revamp Gen Lepas dari Sistem Menggunakan Pola Operasi 2

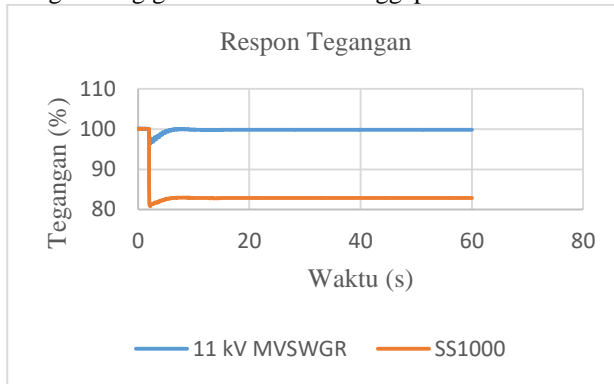
Pada gambar 4.13 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami penurunan disertai dengan osilasi, turun dengan penurunan terendah hingga 99.7483%. Kemudian kenaikan frekuensi tertinggi 100.09%. Sehingga sistem aman karena telah memenuhi standar dari abnormal frekuensi.



Gambar 4.14 Respon Sudut Rotor Bus Ketika Revamp Gen Lepas dari Sistem Menggunakan Pola Operasi 2

Pada gambar 4.14 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Sebelum terjadi gangguan sudut rotor GGCP sebesar 23.32°,

Revamp Gen sebesar 14.48° , UBB sebesar 18.26° . Ketika terjadi gangguan, sudut rotor GGCP mengalami osilasi dengan penurunan terendah 15.35° . Sedangkan kenaikan tertinggi 23.68° kemudian stabil pada 16° hingga akhir simulasi. Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 14.11° . Sedangkan kenaikan tertinggi 18.68° kemudian menurun hingga 17.05° . Sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



Gambar 4.15 Respon Tegangan Bus ketika Revamp Gen Lepas dari Sistem Menggunakan Pola Operasi 2

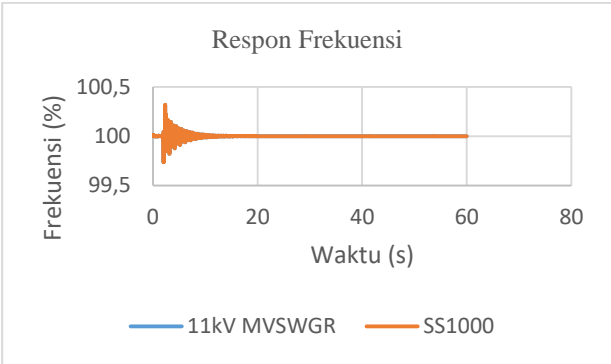
Pada gambar 4.15 menunjukkan terjadi penurunan pada masing masing level tegangan. Bus 11kV MVSWGR setelah terjadi gangguan turun seketika 96.52% pada detik ke 2.201 dan stabil pada 99.799% hingga akhir simulasi. Bus SS1000 turun seketika 80.80% pada detik ke 2.201 dan berada pada posisi 82.86% hingga akhir simulasi. Turunnya tegangan disebabkan beban pada sistem tidak tersuplai penuh.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi dan sudut rotor dapat kembali stabil. Namun respon tegangan tidak stabil dan masih belum memenuhi standar operasi yang diizinkan. Maka untuk mempertahankan peralatan dan memperbaiki respon sistem perlu dilakukan mekanisme *Load Shedding*.

4.3.6 Studi Kasus GTG off, Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan dengan Mekanisme *Load Shedding*

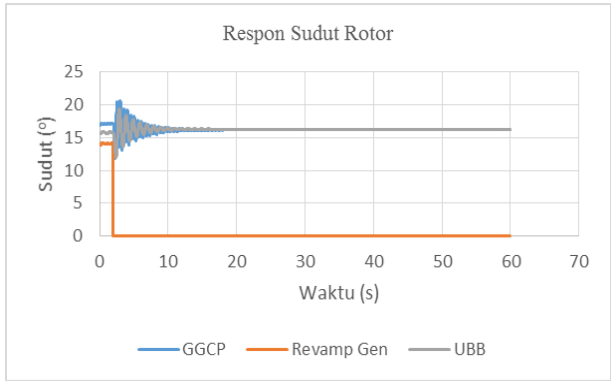
Pada studi kasus ini akan ditampilkan hasil simulasi ketika GTG tidak beroperasi, Revamp Gen lepas dari sistem dilanjutkan dengan mekanisme *Load Shedding*. Pada kasus ini disimulasikan gangguan

terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Pada detik ke 0.2 setelah terjadi gangguan, dilakukan simulasi pelepasan beban sebesar 10.2 MW dari total beban.



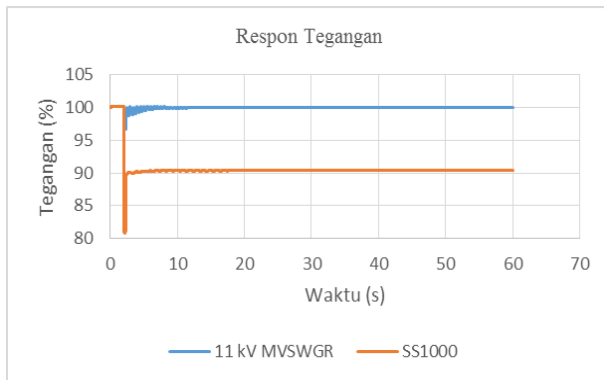
Gambar 4.16 Respon Frekuensi Bus ketika Revamp Gen Lepas Dilanjutkan dengan Load Shedding Menggunakan Pola Operasi 2

Pada gambar 4.16 menunjukkan frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami penurunan sekaligus osilasi. Penurunan terendah pada 99.748% pada detik ke 2.021. Sementara kenaikan tertinggi pada 100.4%. Sehingga sistem aman karena telah memenuhi standar dari abnormal frekuensi.



Gambar 4.17 Respon Sudut Rotor Generator ketika Revamp Gen Lepas Dilanjutkan dengan Load Shedding Menggunakan Pola Operasi 2

Pada gambar 4.17 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Ketika terjadi gangguan kemudian dilanjutkan dengan *Load Shedding*, sudut rotor GGCP mengalami osilasi dengan penurunan terendah 11.87° . Sedangkan kenaikan tertinggi 20.56° kemudian stabil pada 16.16° hingga akhir simulasi. Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 11.99° . Sedangkan kenaikan tertinggi 19.39° kemudian stabil pada 16.28° hingga akhir simulasi. Sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



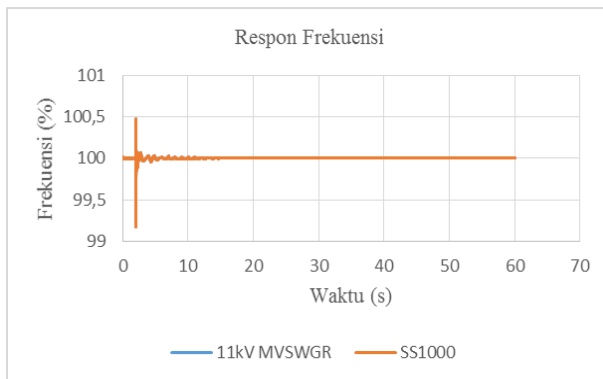
Gambar 4.18 Respon Tegangan Bus ketika Revamp Gen Lepas Dilanjutkan dengan *Load Shedding* Menggunakan Pola Operasi 2

Pada gambar 4.18 menunjukkan terjadi penurunan pada masing masing level tegangan. Tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan ketika 2 detik. Bus 11kV MVSWGR ketika terjadi gangguan, respon tegangan mengalami osilasi dengan penurunan terendah 96.64% pada detik ke 2.241 dan mengalami kenaikan tertinggi 101.32%. Bus SS1000 ketika terjadi gangguan, respon tegangan mengalami osilasi dengan penurunan terendah 80.80% pada detik ke 2.161 dan mengalami kenaikan tertinggi 100.11%. Selanjutnya respon tegangan terus menurun hingga 90.4%.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon tegangan, sudut rotor, frekuensi dapat kembali stabil dan memenuhi standar yang diizinkan.

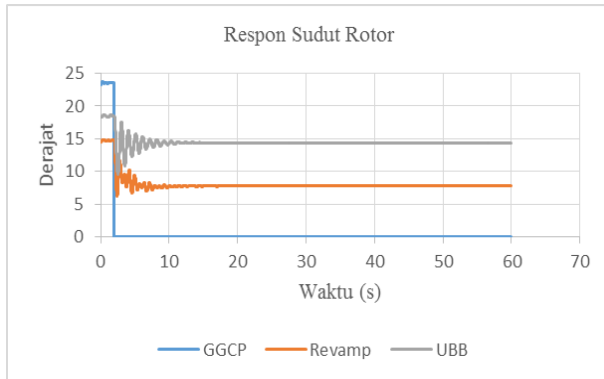
4.3.7 Studi Kasus GTG off dan GGCP Lepas dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini menunjukkan hasil simulasi generator GGCP lepas. Generator GGCP memiliki rating 26.8 MW, namun dalam operasinya daya maksimum yang dihasilkan sebesar 23 MW. Pada pola operasi 2 terdapat 1 generator yang dalam kondisi tidak aktif yaitu GTG dengan daya maksimum sebesar 24 MW. Dalam kasus ini generator disimulasikan lepas pada ketika 2 detik dengan lama simulasi 60 detik.



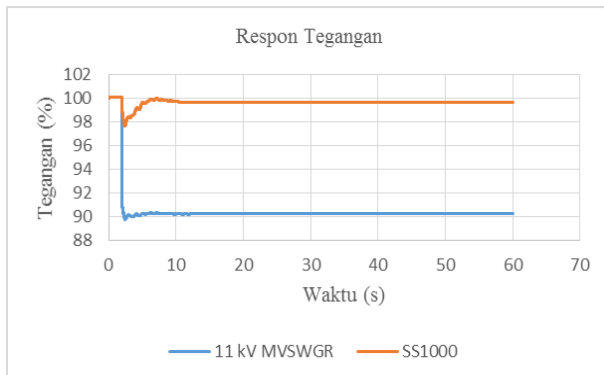
Gambar 4.19 Respon Frekuensi Bus ketika GGCP Lepas Menggunakan Pola Operasi 2

Pada gambar 4.19 menunjukkan frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami penurunan tegangan. Mengalami osilasi terendah hingga 89.76% serta dengan kenaikan tertinggi 100.48%. Frekuensinya pada masing masing bus turun dan stabil di 100%. Sehingga dalam studi kasus tersebut frekuensi sistem berada dalam batas operasi yang diizinkan.



Gambar 4.20 Respon Sudut Rotor ketika GGCP Lepas Menggunakan Pola Operasi 2

Pada gambar 4.20 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Ketika terjadi gangguan, sudut rotor Revamp Gen mengalami osilasi dengan penurunan terendah 6.16° . Sedangkan kenaikan tertinggi 14.89° kemudian stabil pada 7.73° hingga akhir simulasi. Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 9.56° . Sedangkan kenaikan tertinggi 18.68° kemudian stabil pada 14.38° hingga akhir simulasi. Sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



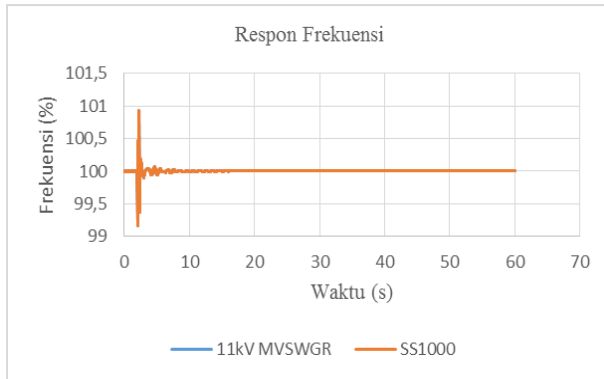
Gambar 4.21 Respon Tegangan Bus ketika GGCP Lepas Menggunakan Pola Operasi 2

Pada gambar 4.21 terjadi kenaikan pada masing masing level tegangan setelah terjadi gangguan pada sistem. Tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan ketika 2 detik. Bus 11kV MVSWGR mengalami penurunan 89.76% pada detik ke 2.841 dan kenaikan sebesar 100.13%. Selanjutnya tegangan stabil di 90.22 %. Bus SS1000 mengalami penurunan 97.62% pada detik ke 2.421 dan kenaikan sebesar 100.11%. Selanjutnya tegangan stabil di 99.69%. Turunnya tegangan disebabkan beban pada sistem tidak tersuplai penuh.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor memenuhi standar yang diizinkan. Namun pada kondisi ini PLN mensuplai daya yang melebihi daya kontrak sehingga diperlukan *Load Shedding* sesuai dengan hilangnya pembangkitan dengan mempertimbangkan daya maksimum yang dapat disuplai oleh *utility* PLN.

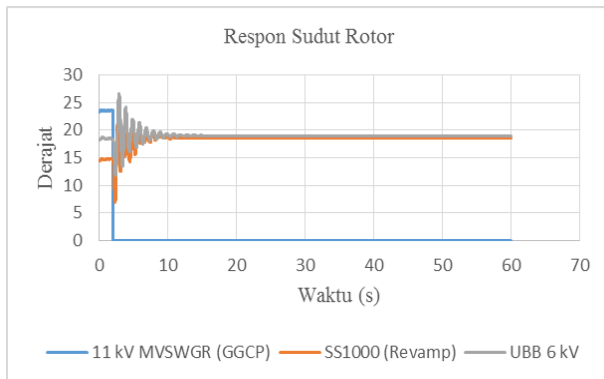
4.3.8 Studi Kasus GTG off, Generator GGCP Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan dengan *Load Shedding*

Pada studi kasus ini menunjukkan hasil simulasi generator GGCP lepas dengan operasi pembangkit model 2 kemudian dilakukan *Load Shedding* untuk menjaga kestabilan sistem. Generator ini mempunyai rating 26.8 MW. Ketika sedang beroperasi normal generator GGCP beroperasi 23 MW. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Pada detik ke 0.2 setelah terjadi gangguan, dilakukan simulasi pelepasan beban sebesar 21.2 MW dari total beban.



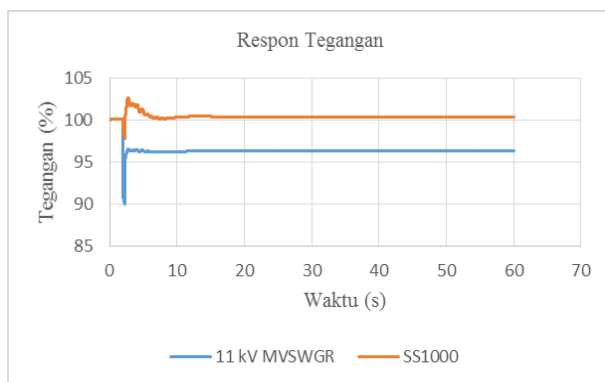
Gambar 4.22 Respon Frekuensi ketika Generator GGCP Lepas Dilanjutkan dengan Load Shedding

Pada gambar 4.22 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing masing level tegangan ketika generator A-001B lepas mengalami osilasi sementara. Frekuensinya pada masing masing bus mengalami osilasi dengan penurunan terendah 99.17% dengan kenaikan tertinggi 100.93%. Kemudian frekuensi stabil pada 100% hingga akhir simulasi. Sehingga dalam studi kasus tersebut respon frekuensi masih dalam batas yang diizinkan.



Gambar 4.23 Respon Sudut Rotor ketika GGCP Lepas Dilanjutkan dengan Load Shedding

Pada gambar 4.23 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Ketika terjadi gangguan, sudut rotor Revamp Gen mengalami osilasi dengan penurunan terendah 6.95° . Sedangkan kenaikan tertinggi 22.34° kemudian stabil pada 18.62° hingga akhir simulasi. Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 11.81° . Sedangkan kenaikan tertinggi 26.66° kemudian stabil pada 18.98° hingga akhir simulasi. Sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



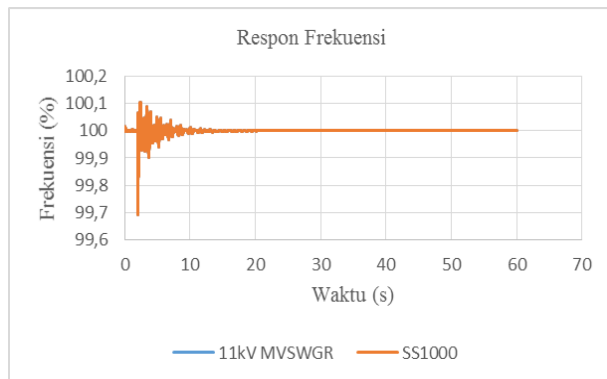
Gambar 4.24 Respon Tegangan ketika GGCP Lepas Dilanjutkan dengan Load Shedding

Pada gambar 4.24 menunjukkan terjadi penurunan pada masing masing level tegangan. Respon tegangan bus 11kV MVSWGR selama terjadi gangguan turun seketika 89.97% pada detik ke 2.281 dengan kenaikan tertinggi pada 100.13%. Kemudian tegangan stabil pada 96.28% hingga akhir simulasi. Bus SS1000 ketika terjadi gangguan turun seketika 97.80% pada detik ke 2.3 kemudian mengalami osilasi dengan kenaikan tertinggi 102.69% kemudian perlahan menurun hingga stabil di 100.45% hingga akhir simulasi.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat kembali stabil dan memenuhi standar yang diizinkan untuk beroperasi.

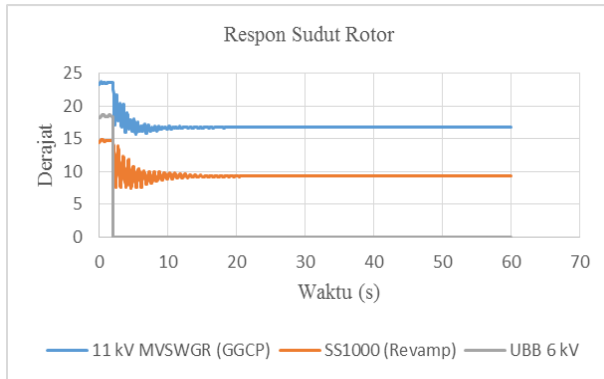
4.3.9 Studi Kasus GTG *off* dan Generator UBB Lepas dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini menunjukkan hasil simulasi generator UBB lepas dengan pola operasi pembangkitan 2. Pola operasi ini memiliki 1 generator yang sedang tidak aktif yaitu GTG dengan daya maksimum 24 MW. Sedangkan generator UBB memiliki daya maksimum 15 MW. Dalam kasus ini generator disimulasikan lepas ketika detik ke-2 dengan lama simulasi 60 detik.



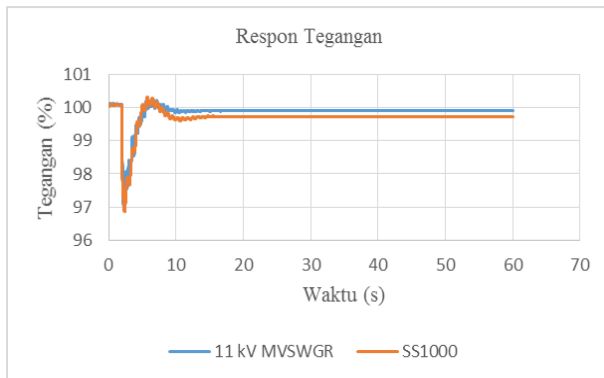
Gambar 4.25 Respon Frekuensi Ketika Generator UBB Lepas Menggunakan Pola Operasi 2

Pada gambar 4.25 dapat dilihat respon frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami penurunan. Akibat lepasnya generator UBB menyebabkan frekuensi mengalami osilasi dengan penurunan terendah 99.69% pada detik ke 2.021 dengan kenaikan tertinggi 100.1% kemudian stabil 100% hingga akhir simulasi.



Gambar 4.26 Respon Sudut Rotor ketika Generator UBB Lepas Menggunakan Pola Operasi 2

Pada gambar 4.26 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Ketika terjadi gangguan, sudut rotor Revamp Gen mengalami osilasi dengan penurunan terendah 7.4° . Sedangkan kenaikan tertinggi 14.89° kemudian stabil pada 9.29° hingga akhir simulasi. Pada generator GGCP, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 15.6° . Sedangkan kenaikan tertinggi 23.68° kemudian stabil pada 16.72° hingga akhir simulasi. Sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



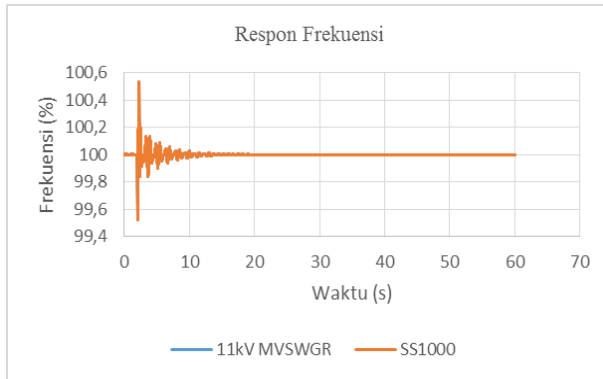
Gambar 4.27 Respon Tegangan ketika Generator UBB Lepas Menggunakan Pola Operasi 2

Pada gambar 4.27 menunjukkan respon tegangan ketika generator UBB lepas menggunakan pola operasi 2. Terjadi penurunan pada masing masing level tegangan setelah terjadi gangguan. Seperti yang terlihat pada Bus 11kV MVSWGR ketika terjadi gangguan mengalami osilasi dengan penurunan terendah 96.89% pada detik ke 2.261 dengan kenaikan tertinggi 100.27% kemudian stabil pada 99.90% hingga akhir simulasi. Sedangkan bus SS1000 mengalami osilasi dengan penurunan terendah 96.87% pada detik ke 2.361 dan kenaikan tertinggi 100.32% kemudian stabil di 99.72% hingga akhir simulasi.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, sudut rotor, dan tegangan dapat kembali stabil pada batas yang diizinkan. Namun jika keadaan ini terus berlanjut, maka sumber dari PLN akan memberikan daya yang melebihi daya kontrak sebesar 17 MW. Sehingga perlu dilakukan mekanisme *Load Shedding* untuk mengembalikan kestabilan sistem dengan mempertimbangkan daya maksimal yang dapat disuplai oleh sumber dari PLN.

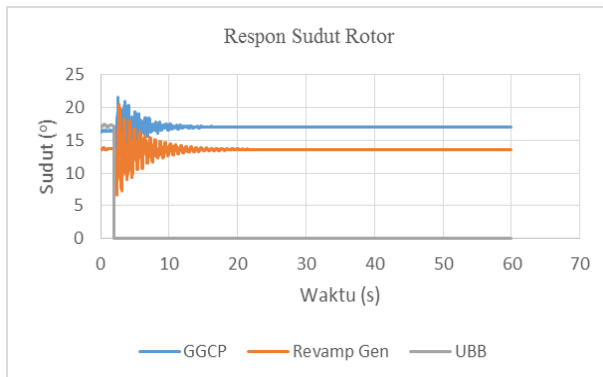
4.3.10 Studi Kasus GTG off, Generator UBB Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan Mekanisme *Load Shedding*

Pada studi kasus ini menunjukkan hasil simulasi generator UBB lepas dengan mekanisme *Load Shedding* menggunakan status karena gangguan yang terjadi menyebabkan utility PLN perlu untuk memberikan daya melebihi daya kontrak. Load shedding yang dilakukan mempertimbangkan daya kontrak maksimal yaitu 17 MW dan disesuaikan dengan besarnya pembangkitan yang hilang akibat lepasnya generator UBB dari sistem. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Pada detik ke 0.2 setelah terjadi gangguan, dilakukan simulasi pelepasan beban sebesar 13.2 MW dari total beban.



Gambar 4.28 Respon Frekuensi ketika Generator UBB Lepas Dilanjutkan Mekanisme *Load Shedding*

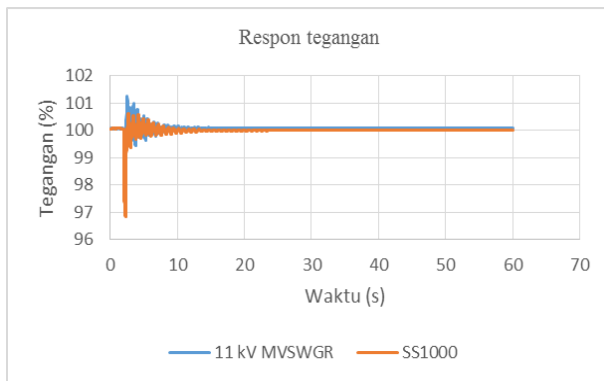
Pada gambar 4.28 menunjukkan frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami osilasi. Ketika terjadi gangguan respon frekuensi mengalami osilasi dengan penurunan terendah hingga 99.526% pada detik ke 2.021 serta kenaikan tertinggi 100.45% kemudian stabil di 100%. Sehingga dalam studi kasus tersebut respon frekuensi sesuai dengan standar operasi yang diizinkan.



Gambar 4.29 Respon Sudut Rotor ketika Generator UBB Lepas Dilanjutkan Mekanisme *Load Shedding*

Pada gambar 4.29 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Sumber dari PLN digunakan sebagai

referensi. Ketika terjadi gangguan, sudut rotor Revamp Gen mengalami osilasi dengan penurunan terendah 6.66° . Sedangkan kenaikan tertinggi 20.4° kemudian stabil pada 13.58° hingga akhir simulasi. Pada generator GGCP, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 9.62° . Sedangkan kenaikan tertinggi 21.64° kemudian stabil pada 17.03° hingga akhir simulasi. Sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



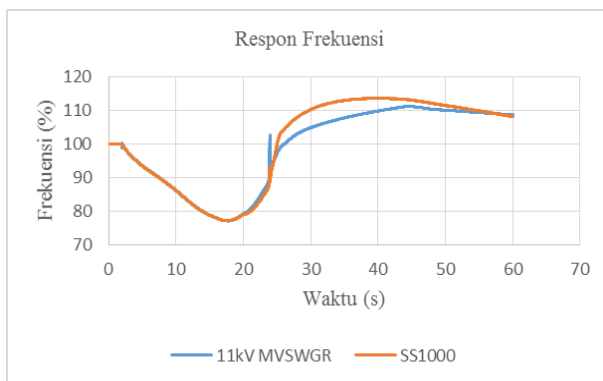
Gambar 4.30 Respon Tegangan ketika Generator UBB Lepas dan Mekanisme *Load Shedding*

Pada gambar 4.30 terjadi kenaikan pada masing masing level tegangan setelah dilakukan *Load Shedding* dengan menggunakan status. Tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan ketika 2 detik. Bus 11kV MVSWGR mengalami osilasi dengan penurunan terendah 96.903% pada detik 2.261 dan tertinggi 101.26%. Kemudian stabil hingga akhir simulasi sebesar 100.08%. Ketika terjadi gangguan Bus SS1000 mengalami osilasi dengan penurunan terendah 96.837% pada detik ke 2.3 dan tertinggi 100.62%. Kemudian tegangan stabil hingga akhir simulasi di 99.99%. Turunnya tegangan disebabkan beban pada sistem tidak tersuplai penuh.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotornya masih memenuhi standar yang diizinkan sehingga aman.

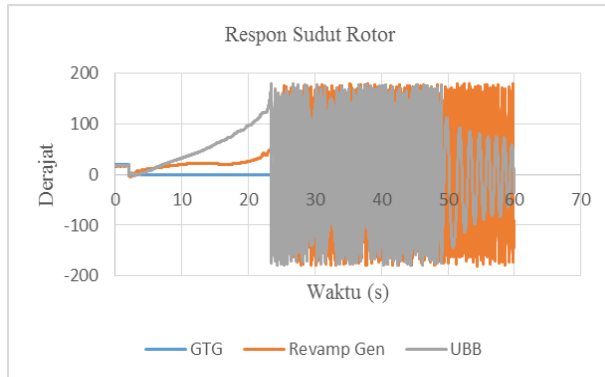
4.3.11 Studi Kasus GGCP off dan Utility Lepas dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini menunjukkan hasil simulasi sumber dari PLN mengalami gangguan dengan menggunakan pola operasi pembangkitan 3. Pada pola operasi ini generator GGCP sedang dalam kondisi tidak aktif dan sumber dari PLN memberikan daya sebesar 17 MW dan semua generator beroperasi dengan daya maksimum untuk memenuhi kebutuhan beban sistem. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik.



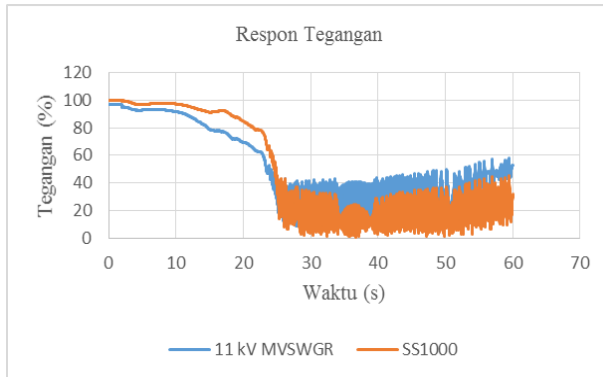
Gambar 4.31 Respon Frekuensi Bus ketika *Utility* PLN Lepas Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.31 menunjukkan bahwa respon frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami penurunan. Respon frekuensinya mengalami penurunan tiba tiba hingga 77.1% kemudian terjadi *loss of sincronization* dengan bus 11kV MVSWGR dengan kenaikan tertinggi 111.19% sedangkan bus SS1000 dengan kenaikan tertinggi 113.63%. Setelah itu frekuensi bertemu kembali diakhir simulasi pada 108.7%. Sehingga sistem tidak aman karena belum memenuhi standar dari abnormal frekuensi.



Gambar 4.32 Respon Sudut Rotor Ketika *Utility* PLN Lepas Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.32 menunjukkan terjadinya perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Ketika sumber dari PLN mengalami gangguan maka generator berkapasitas terbesar yang sedang aktif yaitu generator GTG digunakan sebagai referensi. Sebelum terjadi gangguan sudut rotor GTG sebesar 20.36° , Revamp Gen sebesar 16.66° , UBB sebesar 17.35° . Ketika terjadi gangguan, sudut rotor Revamp gen mengalami osilasi dengan penurunan terendah -180° . Sedangkan kenaikan tertinggi 179.6° kemudian tetap berosilasi hingga akhir simulasi. Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah -179.9° . Sedangkan kenaikan tertinggi 179.78° kemudian tetap berosilasi hingga akhir simulasi. Pada kasus ini terjadi penurunan dan kenaikan seketika pada sudut rotor generator. Hingga akhir simulasi respon sudut rotor masin belum dapat stabil.



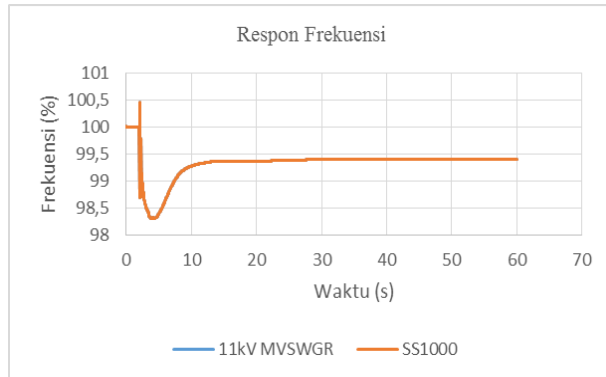
Gambar 4.33 Respon Tegangan Bus ketika *Utility* PLN Lepas Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.33 menunjukkan terjadi penurunan sekaligus osilasi pada masing masing level tegangan. Bus 11kV MVSWGR mengalami penurunan terendah 8.23% dan berosilasi hingga akhir simulasi. Bus SS1000 mengalami penurunan seketika hingga 0.64% selanjutnya terus berosilasi hingga akhir simulasi.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor tidak dapat kembali stabil sesuai dengan standar yang diizinkan sehingga memerlukan adanya pelepasan beban untuk menjaga kestabilan pada sistem.

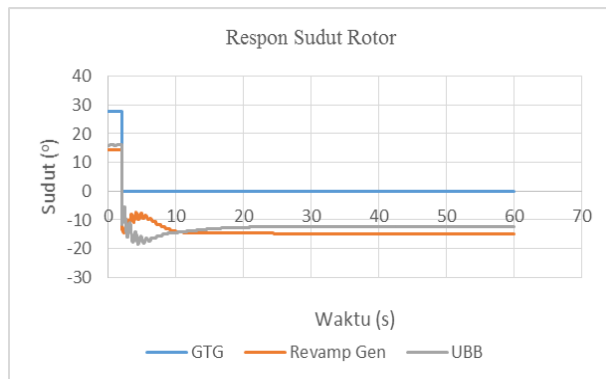
4.3.12 Studi Kasus GGCP *off*, *Utility* Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan Mekanisme *Load Shedding*

Pada studi kasus ini menunjukkan hasil simulasi lepasnya sumber dari *utility* PLN dengan mekanisme *Load Shedding*. Respon frekuensi, sudut rotor, dan tegangan berada pada kondisi yang tidak diizinkan untuk beroperasi ketika mengalami gangguan. Oleh sebab itu perlu dilakukan *Load Shedding* untuk mengembalikan kestabilan sistem. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Pada detik ke 0.2 setelah terjadi gangguan, dilakukan simulasi pelepasan beban sebesar 15 MW dari total beban.



Gambar 4.34 Respon Frekuensi Bus ketika *Utility PLN Lepas Dilanjutkan dengan Load Shedding* Menggunakan Pola Operasi 3

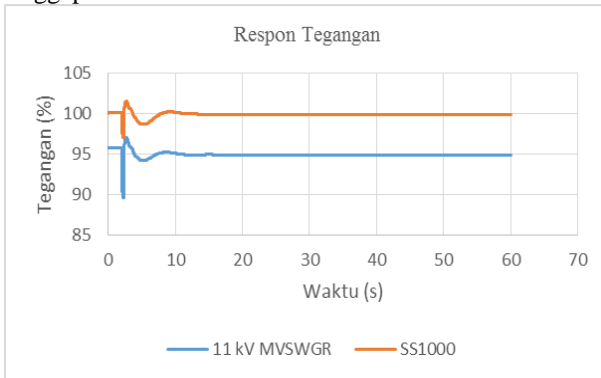
Pada gambar 4.34 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami penurunan. Frekuensinya pada masing-masing bus turun hingga 99.403%, dengan penurunan frekuensi tiba tiba hingga 98.3% pada detik ke 3.881. Sehingga sistem aman karena telah memenuhi standar dari abnormal frekuensi.



Gambar 4.35 Respon Sudut Rotor Ketika *Utility PLN Lepas Dilanjutkan dengan Load Shedding* Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.35 menunjukkan terjadinya perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Ketika sumber dari PLN mengalami gangguan maka generator berkapasitas terbesar yang sedang aktif yaitu

generator GTG digunakan sebagai referensi. Sebelum terjadi gangguan sudut rotor GTG sebesar 27.67° , Revamp Gen sebesar 14.25° , UBB sebesar 15.96° . Ketika terjadi gangguan dan mekanisme *Load Shedding* bekerja, sudut rotor Revamp Gen mengalami osilasi dengan penurunan terendah -14.98° . Sedangkan kenaikan tertinggi 14.45° kemudian stabil pada -14.98° hingga akhir simulasi. Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah -18.34° . Sedangkan kenaikan tertinggi 16.16° kemudian stabil pada -12.22° hingga akhir simulasi. Pada kasus ini terjadi penurunan dan kenaikan seketika pada sudut rotor generator. Namun sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



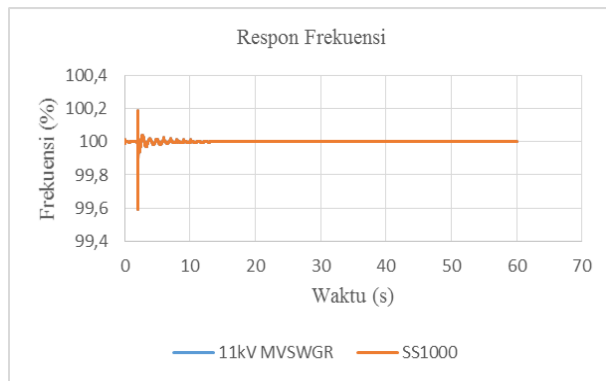
Gambar 4.36 Respon Tegangan Bus ketika *Utility PLN Lepas Dilanjutkan dengan Load Shedding* Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.36 menunjukkan terjadi penurunan pada masing masing level tegangan. Tegangan pada masing-masing bus mengalami osilasi ketika 2 detik. Bus 11kV MVSWGR mengalami penurunan seketika hingga 89.621% pada detik ke 2.281 kemudian naik pada 97.028% dan stabil menjadi 94.876%. Bus SS1000 turun seketika hingga 97.047% pada detik ke 2.3 kemudian naik pada 101.57% dan stabil menjadi 99.924%. Turunnya tegangan disebabkan beban pada sistem tidak tersuplai penuh.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat kembali stabil dan memenuhi standar yang ditentukan.

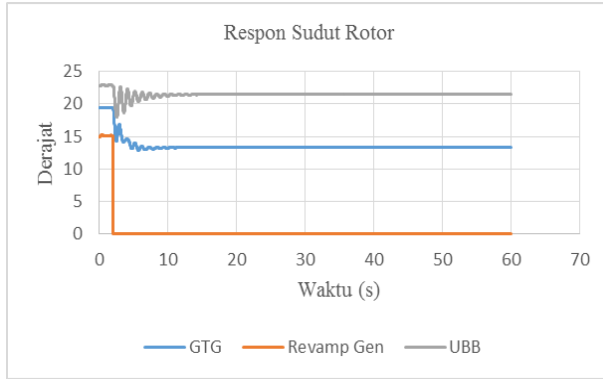
4.3.13 Studi Kasus GGCP *off* dan Generator Revamp Gen Lepas dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini menunjukkan hasil simulasi generator Revamp Gen lepas dengan pola operasi pembangkit 3. Generator ini mempunyai rating 17.5 MW. Namun dalam pengoperasiannya daya maksimal yang dikeluarkan 12 MW. Dalam kasus ini generator disimulasikan lepas pada ketika 2 detik dengan lama simulasi 60 detik.



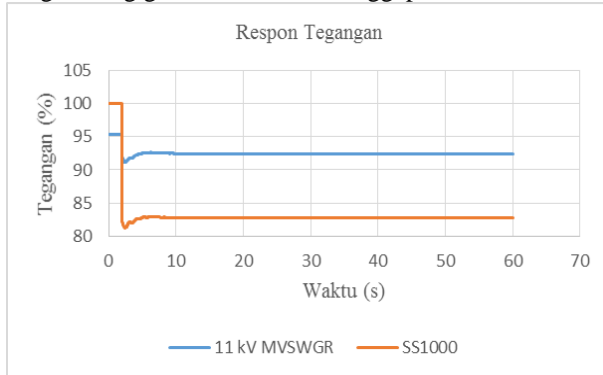
Gambar 4.37 Respon Frekuensi Bus ketika Revamp Gen Lepas Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.37 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami osilasi dengan penurunan terendah hingga 99.59% pada detik ke 2.021. Kemudian kenaikan frekuensi tertinggi 100.189% kemudian stabil pada 100% hingga akhir simulasi. Sehingga sistem aman karena telah memenuhi standar dari abnormal frekuensi.



Gambar 4.38 Respon Sudut Rotor Bus Ketika Revamp Gen Lepas Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.38 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Sebelum terjadi gangguan sudut rotor GTG sebesar 19.42° , Revamp Gen sebesar 14.99° , UBB sebesar 22.76° . Ketika terjadi gangguan, sudut rotor GTG mengalami osilasi dengan penurunan terendah 12.84° . Sedangkan kenaikan tertinggi 19.46° kemudian stabil pada 13.27° hingga akhir simulasi. Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 17.95° . Sedangkan kenaikan tertinggi 22.98° kemudian menurun hingga 21.48° . Sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



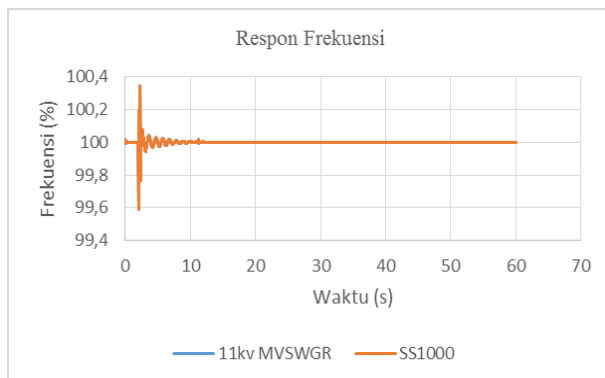
Gambar 4.39 Respon Tegangan Bus ketika Revamp Gen Lepas Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.39 menunjukkan terjadi penurunan pada masing masing level tegangan. Bus 11kV MVSWGR setelah terjadi gangguan turun seketika 91.192% pada detik ke 2.481 dan stabil pada 92.458% hingga akhir simulasi. Bus SS1000 turun seketika 81.269% pada detik ke 2.441 dan berada pada posisi 82.725% hingga akhir simulasi. Turunnya tegangan disebabkan beban pada sistem tidak tersuplai penuh.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi dan sudut rotor dapat kembali stabil. Namun respon tegangan tidak stabil dan masih belum memenuhi standar operasi yang diizinkan. Maka untuk mempertahankan peralatan dan memperbaiki respon sistem perlu dilakukan mekanisme *Load Shedding*.

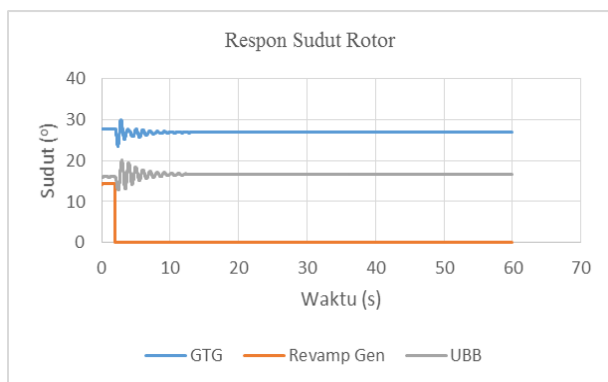
4.3.14 Studi Kasus GGCP off, Revamp Gen Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan Mekanisme *Load Shedding*

Untuk mempertahankan frekuensi dan tegangan sistem maka dilakukan mekanisme *Load Shedding*. Pelepasan beban yang direncanakan disesuaikan dengan nominal pembangkitan yang hilang dengan mempertimbangkan sumber dari PLN agar tidak melebihi daya kontrak dengan PLN yaitu sebesar 17 MW. Pada kasus ini disimulasikan gangguan terjadi pada $t = 2$ detik dengan total waktu simulasi 60 detik. Pada detik ke 0.2 setelah terjadi gangguan, dilakukan simulasi pelepasan beban sebesar 11 MW dari total beban.



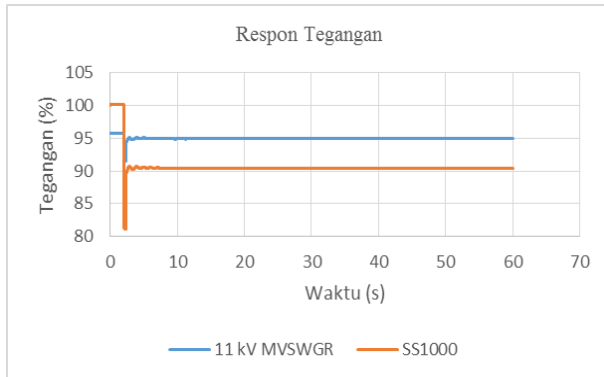
Gambar 4.40 Respon Frekuensi Bus ketika Revamp Gen Lepas Dilanjutkan dengan *Load Shedding* Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.40 menunjukkan frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami osilasi. Penurunan terendah pada 99.594% pada detik ke 2.021. Sementara kenaikan tertinggi pada 100.46%. Sehingga sistem aman karena telah memenuhi standar dari abnormal frekuensi.



Gambar 4.41 Respon Sudut Rotor Generator ketika Revamp Gen Lepas Dilanjutkan dengan *Load Shedding* Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.41 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Ketika terjadi gangguan kemudian dilanjutkan dengan *Load Shedding*, sudut rotor GTG mengalami osilasi dengan penurunan terendah 23.39°. Sedangkan kenaikan tertinggi 30.1° kemudian stabil pada 26.89° hingga akhir simulasi. Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 12.79°. Sedangkan kenaikan tertinggi 20.08° kemudian stabil pada 16.65° hingga akhir simulasi. Sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



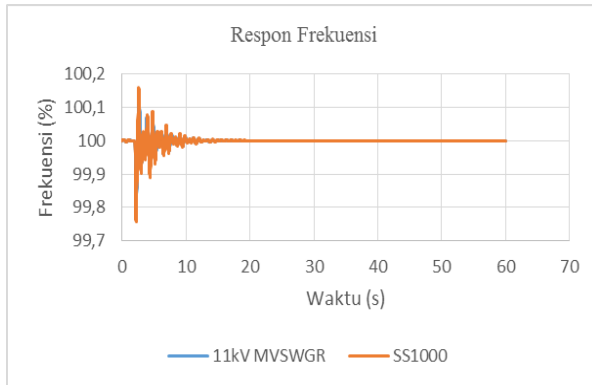
Gambar 4.42 Respon Tegangan Bus ketika Revamp Gen Lepas Dilanjutkan dengan *Load Shedding* Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.42 menunjukkan terjadi penurunan pada masing masing level tegangan. Tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan ketika 2 detik. Bus 11kV MVSWGR ketika terjadi gangguan, respon tegangan mengalami penurunan terendah hingga 91.456% pada detik ke 2.281 dan mengalami kenaikan tertinggi 95.762% kemudian stabil pada 94.9% hingga akhir simulasi. Bus SS1000 ketika terjadi gangguan, respon tegangan mengalami penurunan terendah 81.076% pada detik ke 2.3 dan mengalami kenaikan tertinggi 100.11% kemudian stabil pada 90.43% hingga akhir simulasi.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon tegangan, sudut rotor, frekuensi dapat kembali stabil dan memenuhi standar yang diizinkan.

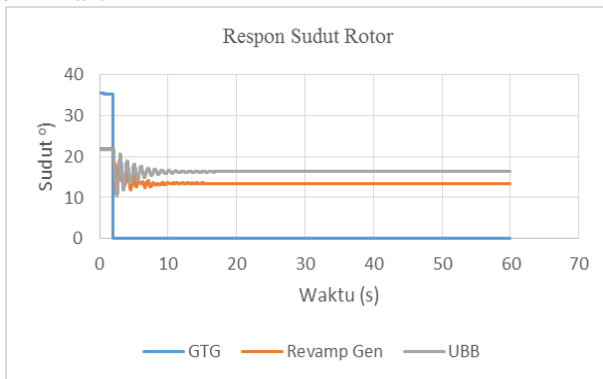
4.3.15 Studi Kasus GGCP *off* dan Generator GTG Lepas dari Sistem ($t=2s$)

Pada studi kasus ini menunjukkan hasil simulasi generator GTG lepas. Generator GTG memiliki rating 33 MW, namun dalam operasinya daya maksimum yang dihasilkan sebesar 24 MW. Pada pola operasi 3 terdapat 1 generator yang dalam kondisi tidak aktif yaitu GGCP dengan daya maksimum sebesar 23 MW. Dalam kasus ini generator disimulasikan lepas pada ketika 2 detik dengan lama simulasi 60 detik.



Gambar 4.43 Respon Frekuensi ketika Geneartor GTG Lepas Menggunakan Pola Operasi 3

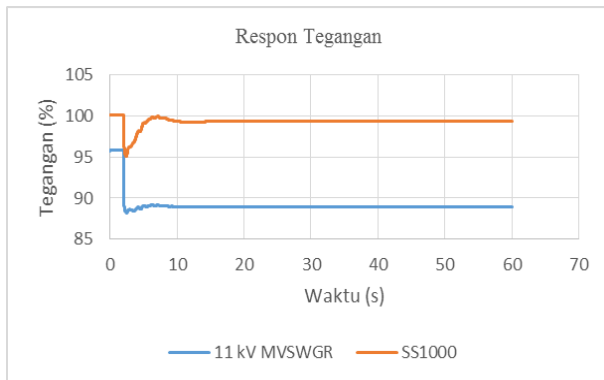
Pada gambar 4.43 menunjukkan frekuensi bus pada masing masing level tegangan mengalami osilasi dengan level terendah hingga 99.7% pada detik ke 2.141 serta dengan kenaikan tertinggi 100.13%. Frekuensi pada masing masing bus stabil di 100% hingga akhir simulasi. Sehingga dalam studi kasus tersebut frekuensi sistem berada dalam batas operasi yang diizinkan.



Gambar 4.44 Respon Sudut Rotor ketika Generator GTG Lepas Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.44 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Ketika terjadi gangguan, sudut rotor Revamp Gen mengalami

osilasi dengan penurunan terendah 9.83° . Sedangkan kenaikan tertinggi 23.01° kemudian stabil pada 11.2° hingga akhir simulasi. Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 10.39° . Sedangkan kenaikan tertinggi 22.36° kemudian stabil pada 17.58° hingga akhir simulasi. Sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



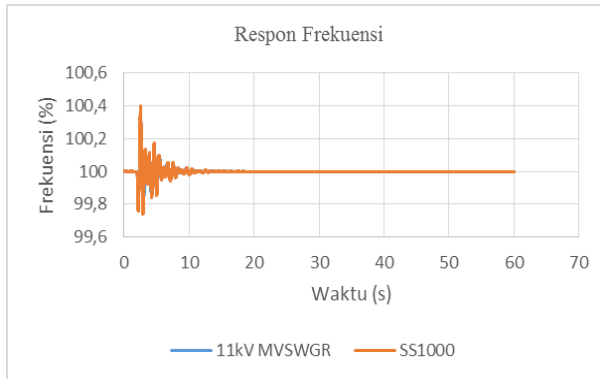
Gambar 4.45 Respon Tegangan ketika GTG Lepas Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.45 terjadi kenaikan pada masing masing level tegangan setelah terjadi gangguan pada sistem. Tegangan pada masing-masing bus mengalami penurunan ketika 2 detik. Bus 11kV MVSWGR mengalami penurunan 88.171% pada detik ke 2.461 dan kenaikan tertinggi sebesar 95.739%. Selanjutnya tegangan stabil di 82.931%. Bus SS1000 mengalami penurunan 95.084% pada detik ke 2.421 dan kenaikan tertinggi sebesar 100.14%. Selanjutnya tegangan stabil di 99.312%. Turunnya tegangan disebabkan beban pada sistem tidak tersuplai penuh.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor memenuhi standar yang diizinkan. Namun pada kondisi ini PLN mensuplai daya yang melebihi daya kontrak sehingga diperlukan *Load Shedding* sesuai dengan hilangnya pembangkitan dengan mempertimbangkan daya maksimum yang dapat disuplai oleh *utility* PLN.

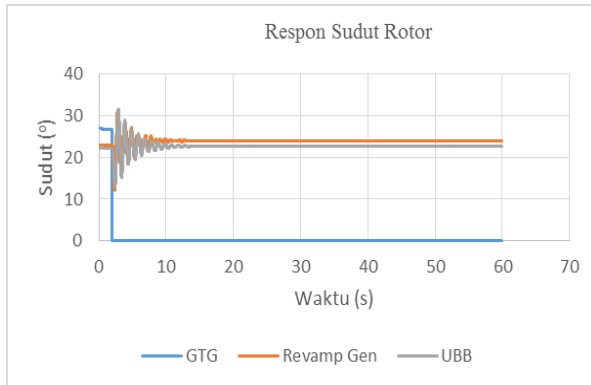
4.3.16 Studi Kasus GGCP off, Generator GTG Lepas dari Sistem ($t=2s$) Dilanjutkan dengan *Load Shedding*

Pada studi kasus ini menunjukkan hasil simulasi generator GTG lepas dengan operasi pembangkit model 3 kemudian dilakukan *Load Shedding* untuk menjaga kestabilan sistem. Generator ini mempunyai rating 33 MW. Ketika sedang beroperasi normal generator GGCP beroperasi 24 MW. Dalam kasus ini generator disimulasikan lepas pada waktu 2 detik dengan lama simulasi 60 detik. Kemudian pada detik 0.2 setelah terjadinya gangguan disimulasikan pelepasan beban sebesar 23 MW.



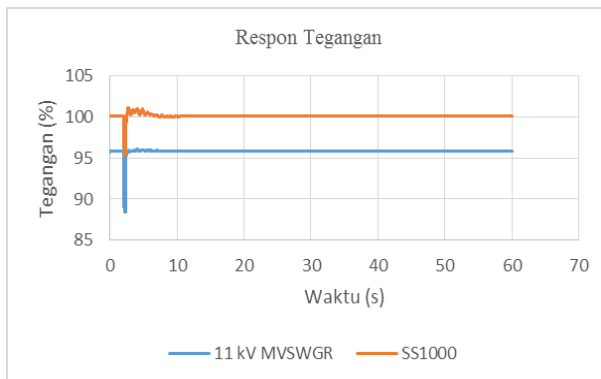
Gambar 4.46 Respon Frekuensi ketika Generator GTG Lepas Dilanjutkan dengan *Load Shedding* Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.46 menunjukkan bahwa frekuensi bus pada masing masing level tegangan ketika generator GTG lepas mengalami osilasi sementara. Frekuensinya pada masing masing bus mengalami osilasi dengan penurunan terendah 99.7% pada detik ke 2.141 dengan kenaikan tertinggi 100.35%. Kemudian frekuensi stabil pada 100% hingga akhir simulasi. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106/1968 penurunan frekuensi yang terjadi pada studi kasus ini masih diperbolehkan.



Gambar 4.47 Respon Sudut Rotor ketika GTG Lepas Dilanjutkan dengan *Load Shedding* Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.47 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Ketika terjadi gangguan, sudut rotor Revamp Gen mengalami osilasi dengan penurunan terendah 12.11° . Sedangkan kenaikan tertinggi 29.86° kemudian stabil pada 26.36° hingga akhir simulasi. Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 12.86° . Sedangkan kenaikan tertinggi 30.54° kemudian stabil pada 21.35° hingga akhir simulasi. Sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



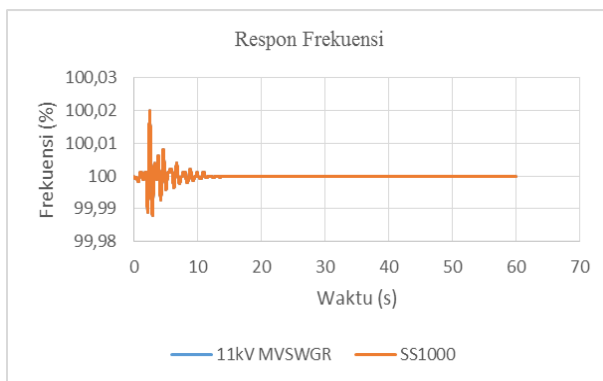
Gambar 4.48 Respon Tegangan ketika GTG Lepas Dilanjutkan dengan *Load Shedding* Menggunakan Pola Operasi 3

Pada gambar 4.48 menunjukkan terjadi penurunan pada masing masing level tegangan. Respon tegangan bus 11kV MVSWGR selama terjadi gangguan turun seketika 88.457% pada detik ke 2.281 dengan kenaikan tertinggi pada 96.238%. Kemudian tegangan stabil pada 95.894% hingga akhir simulasi. Bus SS1000 ketika terjadi gangguan turun seketika 95.309% pada detik ke 2.3 kemudian mengalami osilasi dengan kenaikan tertinggi 101.14% kemudian perlahan menurun hingga stabil di 100.13% hingga akhir simulasi.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat kembali stabil dan memenuhi standar yang diizinkan untuk beroperasi.

4.3.17 Studi Kasus *Short Circuit* Bus LV2 SWGR

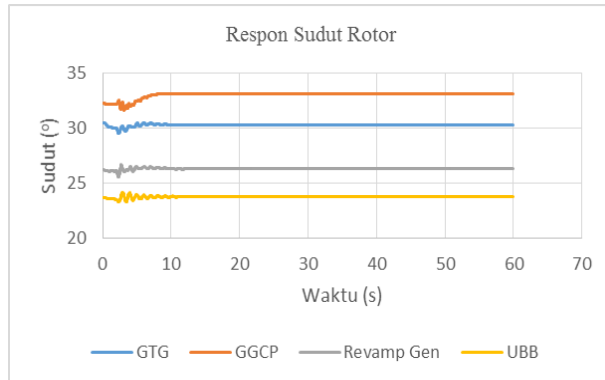
Studi kasus hubung singkat terjadi pada bus LV2 SWGR. Bus tersebut berada pada level tegangan 0.4 kV. Disimulasikan hubung singkat pada 2 detik. Pengaman rele melindungi bus LV2 SWGR pada setting 0.1 s sehingga cb akan membuka pada waktu 0.3 detik. Dengan rincian 0.1 s (Setting rele) + 0.1 (Waktu sensing) + 0.1 (waktu CB membuka).



Gambar 4.49 Respon Frekuensi ketika Short Circuit di Bus LV2 SWGR

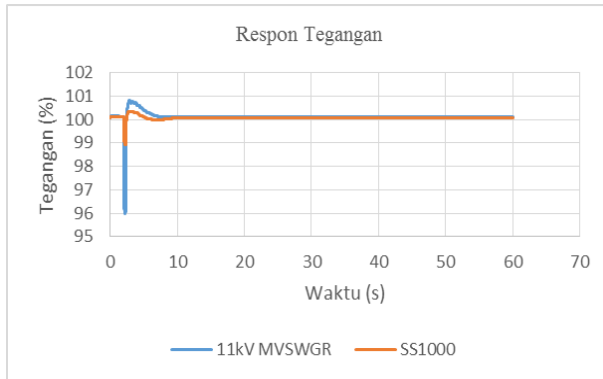
Pada gambar 4.49 menunjukkan frekuensi bus 11kV MVSWGR dan SS1000 mengalami osilasi. Frekuensi bus mengalami osilasi terendah 99.988% pada detik ke 2.181 dan tertinggi hingga 100.02%, kemudian

kembali stabil 100%. Pada studi kasus hubung singkat pada bus LV2 SWGR frekuensi masih dalam batas yang diizinkan untuk beroperasi.



Gambar 4.50 Respon Sudut Rotor ketika Short Circuit di Bus LV2 SWGR

Pada gambar 4.50 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator ketika gangguan hubung singkat terjadi. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Sebelum terjadi gangguan sudut rotor GTG sebesar 30.46° , GGCP sebesar 32.26° , Revamp Gen sebesar 26.22° , UBB sebesar 23.74° . Ketika terjadi gangguan, sudut rotor GTG mengalami osilasi dengan penurunan terendah 29.52° . Sedangkan kenaikan tertinggi 30.51° kemudian stabil pada 30.31° . Pada generator GGCP, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 31.66° . Sedangkan kenaikan tertinggi 33.17° kemudian stabil pada 33.12° . Pada generator Revamp Gen, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 25.55° . Sedangkan kenaikan tertinggi 26.88° kemudian stabil hingga 26.33° . Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 23.32° . Sedangkan kenaikan tertinggi 24.16° kemudian stabil hingga 23.79° . Pada kasus ini terjadi penurunan dan kenaikan seketika pada sudut rotor generator akibat gangguan hubung singkat yang terjadi. Namun sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



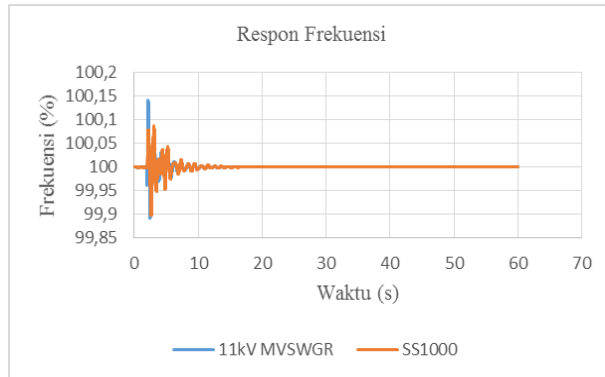
Gambar 4.51 Respon Tegangan ketika Short Circuit di Bus LV2 SWGR

Pada gambar 4.51 menunjukkan terjadi kenaikan tegangan pada bus 11kV MVSWGR dan SS1000. Ketika terjadi gangguan, respon tegangan Bus 11kV MVSWGR mengalami osilasi dengan penurunan terendah 95.991% pada detik ke 2.221, kemudian kenaikan tertinggi 100.81%. Selanjutnya stabil di tegangan 100.12%. Sedangkan respon tegangan Bus SS1000 mengalami osilasi dengan penurunan terendah 98.931% pada detik ke 2.281, kemudian kenaikan tertinggi 100.33%. Selanjutnya stabil di tegangan 100.07%.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor kembali stabil dan memenuhi standar sehingga aman.

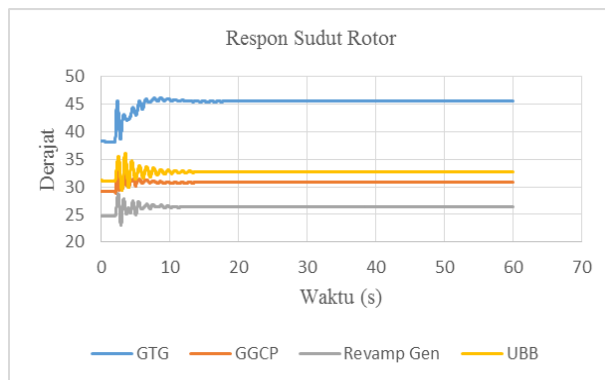
4.3.18 Studi Kasus *Short Circuit* Bus PS-2281 A-1

Studi kasus hubung singkat terjadi pada bus PS-2281 A-1. Bus tersebut berada pada level tegangan 6kV. Disimulasikan hubung singkat pada 2 detik. Pengaman rele melindungi bus PS-2281 A-1 pada setting 0.1 s sehingga cb akan membuka pada waktu 0.3 detik. Dengan rincian 0.1 s (Setting rele) + 0.1 (Waktu sensing) + 0.1 (waktu CB membuka). Total waktu pada simulasi kasus ini adalah 60 detik.



Gambar 4.52 Respon Frekuensi ketika Short Circuit di Bus PS-2281 A-1

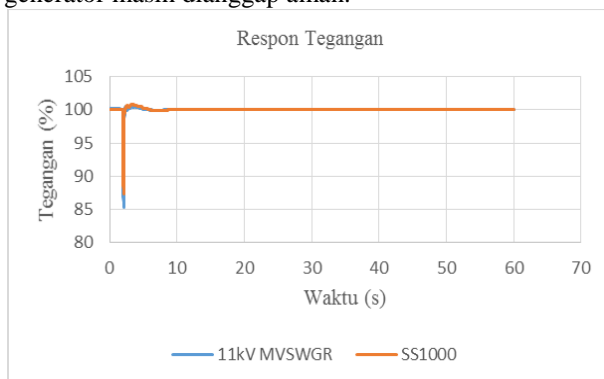
Pada gambar 4.52 menunjukkan frekuensi bus 11kV MVSWGR dan SS1000 mengalami osilasi. Bus 11kV MVSWGR mengalami osilasi tertinggi hingga 100.141%, kemudian kembali stabil 100%. Bus SS1000 mengalami osilasi tertinggi hingga 100.088%, kemudian kembali stabil 100%. Pada studi kasus hubung singkat pada bus PS-2281 A-1 frekuensi masih dalam batas yang diizinkan untuk beroperasi.



Gambar 4.53 Respon Sudut Rotor ketika Short Circuit di Bus PS-2281 A-1

Pada gambar 4.53 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator ketika gangguan hubung singkat terjadi. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Sebelum terjadi gangguan sudut rotor GTG sebesar 38.32°, GGCP sebesar 29.25°,

Revamp Gen sebesar 24.8° , UBB sebesar 31.15° . Ketika terjadi gangguan, sudut rotor GTG mengalami osilasi dengan penurunan terendah 38.02° . Sedangkan kenaikan tertinggi 46.16° kemudian stabil pada 45.49° . Pada generator GGCP, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 28.9° . Sedangkan kenaikan tertinggi 34.3° kemudian stabil pada 30.83° . Pada generator Revamp Gen, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 23.1° . Sedangkan kenaikan tertinggi 28.74° kemudian stabil hingga 26.42° . Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 29.42° . Sedangkan kenaikan tertinggi 36.15° kemudian stabil hingga 32.7° . Pada kasus ini terjadi penurunan dan kenaikan seketika pada sudut rotor generator akibat gangguan hubung singkat yang terjadi. Namun sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



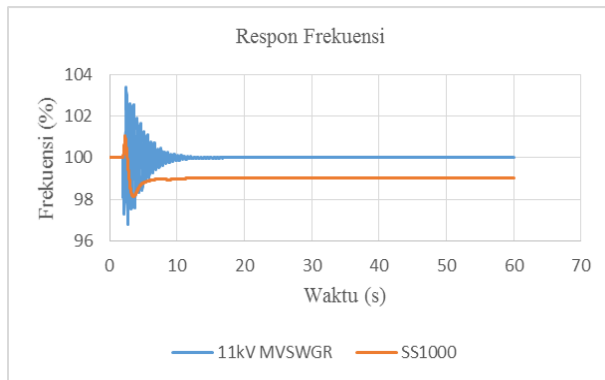
Gambar 4.54 Respon Tegangan ketika Short Circuit di Bus PS-2281 A-1

Pada gambar 4.54 menunjukkan terjadi kenaikan tegangan pada bus 11kV MVSWGR dan SS1000. Ketika terjadi gangguan, respon tegangan Bus 11kV MVSWGR mengalami osilasi dengan penurunan terendah 85.37%, kemudian kenaikan tertinggi 100.686%. Selanjutnya stabil di tegangan 100.092%. Sedangkan respon tegangan Bus SS1000 mengalami osilasi dengan penurunan terendah 87.33%, kemudian kenaikan tertinggi 100.87%. Selanjutnya stabil di tegangan 100.066%.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor kembali stabil dan memenuhi standar sehingga aman.

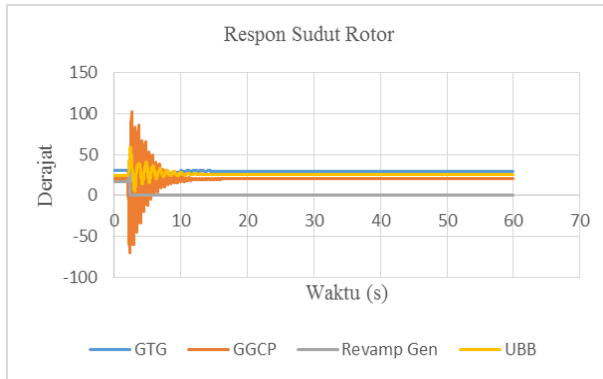
4.3.19 Studi Kasus *Short Circuit* Bus UBB 20kV B

Studi kasus hubung singkat terjadi pada bus UBB 20kV B. Bus tersebut berada pada level tegangan 20kV. Disimulasikan hubung singkat pada 2 detik. Pengaman rele melindungi bus UBB 20kV B pada setting 0.1 s sehingga cb akan membuka pada waktu 0.3 detik. Dengan rincian 0.1 s (Setting rele) + 0.1 (Waktu sensing) + 0.1 (waktu CB membuka).



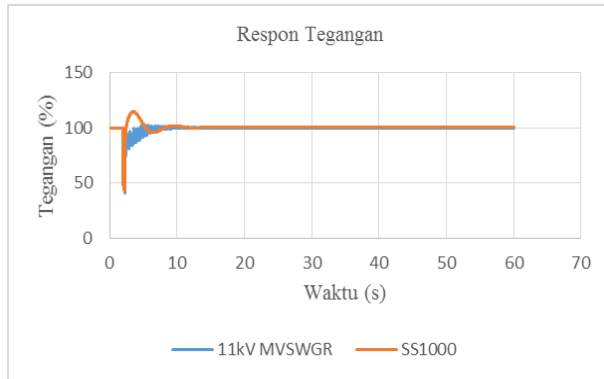
Gambar 4.55 Respon Frekuensi ketika Short Circuit di Bus UBB 20kV B

Pada gambar 4.55 menunjukkan respon frekuensi bus masing-masing level tegangan. Berdasarkan hasil simulasi didapatkan 2 nilai respon frekuensi yang berbeda, hal ini dikarenakan setelah CB terbuka menyebabkan Revamp Gen terlepas dari sistem dan menanggung beban pada bus SS1000 secara keseluruhan. Bus SS1000 mengalami osilasi tertinggi hingga 101.05%, terendah pada 98.122%, kemudian turun 99.037% hingga akhir simulasi. Bus 11kV MVSWGR mengalami osilasi tertinggi hingga 103.42%, terendah 96.787%, kemudian kembali stabil 100%. Pada studi kasus hubung singkat pada bus UBB 20kV B frekuensi masih dalam batas yang diizinkan untuk beroperasi untuk bus 11kV MVSWGR namun belum stabil untuk bus SS1000.



Gambar 4.56 Respon Sudut Rotor ketika Short Circuit di Bus UBB 20kV B

Pada gambar 4.56 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator ketika gangguan hubung singkat terjadi. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Sebelum terjadi gangguan sudut rotor GTG sebesar 30.49° , GGCP sebesar 20.28° , Revamp Gen sebesar 16.65° , UBB sebesar 24.32° . Ketika terjadi gangguan, sudut rotor GTG mengalami osilasi dengan penurunan terendah 3.39° . Sedangkan kenaikan tertinggi 49.39° kemudian stabil pada 29.59° . Pada generator GGCP, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah -69.77° . Sedangkan kenaikan tertinggi 102.2° kemudian stabil pada 20.04° . Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 5.52° . Sedangkan kenaikan tertinggi 57.94° kemudian stabil hingga 25.52° . Pada kasus ini terjadi penurunan dan kenaikan seketika pada sudut rotor generator akibat gangguan hubung singkat yang terjadi. Namun sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.

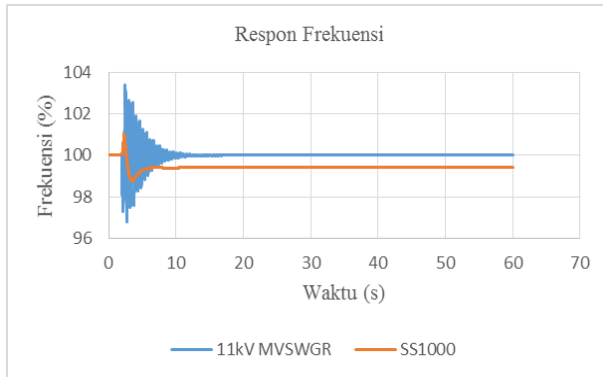


Gambar 4.57 Respon Tegangan ketika Short Circuit di Bus UBB 20kV B

Pada gambar 4.57 menunjukkan terjadi kenaikan tegangan pada bus 11kV MVSWGR dan SS1000. Ketika terjadi gangguan, respon tegangan Bus 11kV MVSWGR mengalami osilasi dengan penurunan terendah 40.502%, kemudian kenaikan tertinggi 102.24%. Selanjutnya stabil di tegangan 99.97%. Sedangkan respon tegangan Bus SS1000 mengalami osilasi dengan penurunan terendah 42.292%, kemudian kenaikan tertinggi 114.55%. Selanjutnya stabil di tegangan 100.4%.

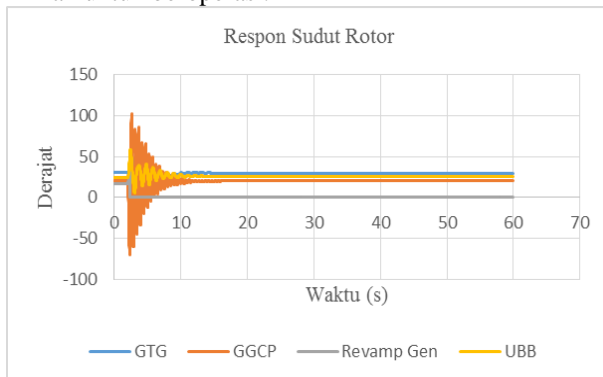
Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon tegangan, dan sudut rotor kembali stabil dan memenuhi standar sehingga aman. Namun respon frekuensi pada bus SS1000 yang telah terlepas dari sistem belum stabil dan menyebabkan generator Revamp Gen mesuplai beban pada SS1000 melebihi dari daya maksimum yang dapat dihasilkan. Oleh karena itu perlu dilakukan Load Shedding untuk menstabilkan bus SS1000.

Mekanisme Load Shedding kali ini dilakukan menggunakan status. Respon frekuensi pada bus SS1000 yang terlepas dari sistem belum dapat kembali stabil sesuai batas yang diizinkan untuk beroperasi. Hal ini terjadi karena generator Revamp Gen mensuplai beban melebihi daya maksimum yang dapat dihasilkan sehingga menyebabkan frekuensi pada bus SS1000 menurun.



Gambar 4.58 Respon Frekuensi ketika Short Circuit di Bus UBB 20kV B Dilanjutkan dengan *Load Shedding*

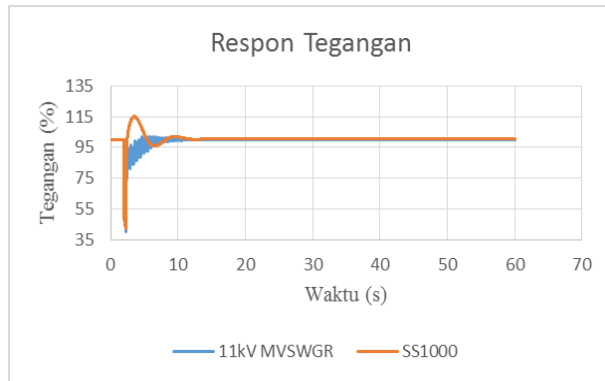
Pada gambar 4.58 menunjukkan respon frekuensi bus masing-masing level tegangan. Bus SS1000 mengalami osilasi tertinggi hingga 101.05%, terendah pada 98.779%, kemudian turun 99.438% hingga akhir simulasi. Bus 11kV MVSWGR mengalami osilasi tertinggi hingga 103.42%, terendah 96.787%, kemudian kembali stabil 100%. Pada studi kasus hubung singkat pada bus UBB 20kV B frekuensi masih dalam batas yang diizinkan untuk beroperasi.



Gambar 4.59 Respon Sudut Rotor Ketika Short Circuit di Bus UBB 20kV B Dilanjutkan dengan *Load Shedding*

Pada gambar 4.59 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada masing masing generator ketika gangguan hubung singkat

terjadi. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Sebelum terjadi gangguan sudut rotor GTG sebesar 30.49° , GGCP sebesar 20.28° , Revamp Gen sebesar 16.65° , UBB sebesar 24.32° . Ketika terjadi gangguan, sudut rotor GTG mengalami osilasi dengan penurunan terendah 3.39° . Sedangkan kenaikan tertinggi 49.39° kemudian stabil pada 29.59° . Pada generator GGCP, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah -69.77° . Sedangkan kenaikan tertinggi 102.2° kemudian stabil pada 20.04° . Pada generator UBB, sudut rotor mengalami osilasi dengan penurunan terendah 5.52° . Sedangkan kenaikan tertinggi 57.94° kemudian stabil hingga 25.52° . Pada kasus ini terjadi penurunan dan kenaikan seketika pada sudut rotor generator akibat gangguan hubung singkat yang terjadi. Namun sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.

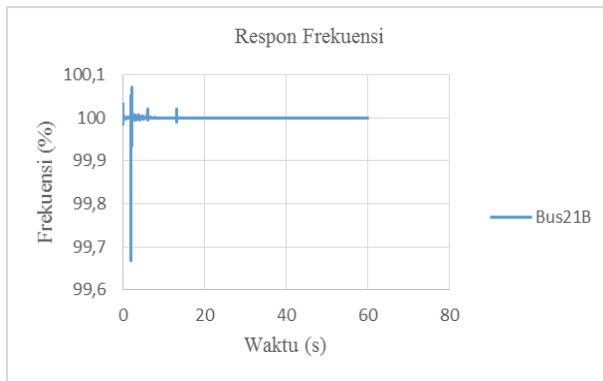


Gambar 4.60 Respon Tegangan Ketika Short Circuit di Bus UBB 20kV B Dilanjutkan dengan Load Shedding

Pada gambar 4.60 menunjukkan terjadi kenaikan tegangan pada bus 11kV MVSWGR dan SS1000. Ketika terjadi gangguan, respon tegangan Bus 11kV MVSWGR mengalami osilasi dengan penurunan terendah 40.502%, kemudian kenaikan tertinggi 102.24%. Selanjutnya stabil di tegangan 99.97%. Sedangkan respon tegangan Bus SS1000 mengalami osilasi dengan penurunan terendah 42.292%, kemudian kenaikan tertinggi 115.15%. Selanjutnya stabil di tegangan 100.58%.

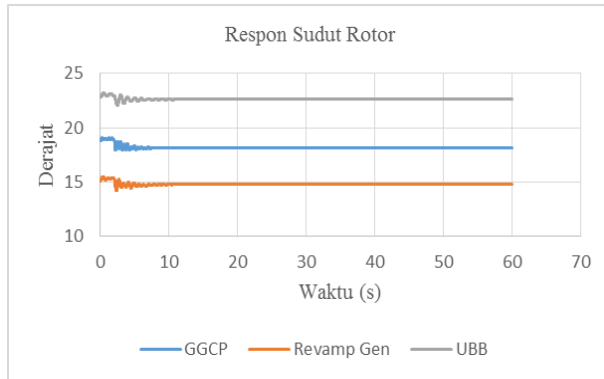
4.3.20 Studi Kasus Motor P21201A Start

Simulasi motor starting disimulasikan sesuai dengan model motor, dijelaskan pada bab 3. Motor starting disimulasikan ketika sistem bekerja secara normal setelah 2 detik. Proses starting motor P21201A menyebabkan terjadinya drop tegangan secara cepat karena motor akan menyerap arus dengan jumlah yang besar pada sistem. Besarnya arus yang diserap bergantung pada jenis motor. Apabila drop tegangan melewati batas standar yang diizinkan maka kestabilan sistem akan terganggu. Untuk studi kasus ini digunakan pola operasi 2 yaitu dengan 4 generator aktif, 1 generator tidak aktif yaitu generator GTG dengan kapasitas maksimum 24 MW. Hal itu untuk menguji kestabilan sistem ketika beroperasi secara minimal. Motor P21201A memiliki rating tegangan 6.3kV dengan kapasitas 1670 kW.



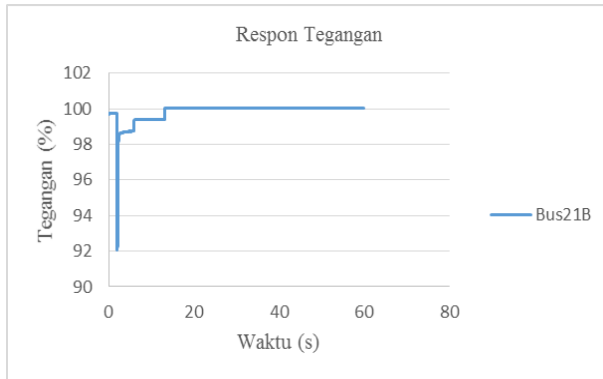
Gambar 4.61 Respon Frekuensi ketika Motor P21201A Start

Pada gambar 4.61 menunjukkan terjadi perubahan respon frekuensi pada bus 21B yang berlokasi dekat dengan motor. Terjadi osilasi frekuensi secara sementara dengan penurunan terendah pada 99.668%, dengan kenaikan tertinggi 100.07% kemudian kembali stabil menjadi 100% hingga akhir simulasi. Dalam kasus ini frekuensi masih dalam batas yang diizinkan untuk beroperasi.



Gambar 4.62 Respon Sudut Rotor ketika Motor P21201A *Start*

Pada gambar 4.62 menunjukkan terjadi perubahan respon sudut rotor pada Bus21b akibat motor P21201A menyala. Sumber dari PLN digunakan sebagai referensi. Sebelum terjadinya gangguan sudut rotor generator GGCP 18.77°, Revamp Gen 15.12°, UBB 22.84°. Ketika gangguan generator GGCP mengalami osilasi dengan penurunan terendah 17.96° kemudian naik hingga 19.08° dan stabil pada 18.15° hingga akhir simulasi. Sedangkan Revamp Gen mengalami osilasi dengan penurunan terendah 14.23° kemudian naik hingga 15.47° dan stabil pada 14.76° hingga akhir simulasi. Sedangkan generator UBB mengalami osilasi dengan penurunan terendah 22.06° kemudian naik hingga 23.2° dan stabil pada 22.58° hingga akhir simulasi. Pada kasus ini terjadi penurunan dan kenaikan seketika pada sudut rotor generator. Namun sudut rotor pada masing masing generator masih dianggap aman.



Gambar 4.63 Respon Tegangan ketika Motor P21201A *Start*

Pada gambar 4.63 menunjukkan terjadi perubahan respon tegangan pada Bus21B. Hal tersebut dikarenakan bus tersebut terhubung langsung dengan motor P21201A. Namun penurunan tegangan masih masuk dalam standar yang diizinkan. Bus21B turun seketika hingga 92.04% dan stabil pada tegangan 100.05%.

Berdasarkan data dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor kembali stabil dan memenuhi standar yang diizinkan.

4.4 Rekapitulasi Data

Tabel 4.3 Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Generator *Outage*

Kasus	f(%) min	f(%) steady state	ID Bus	V(%) min	V(%) steady state	kondisi	
						f	V
Revamp Trip	99,809	100	11 kV MVSW GR	97,58 7	99,925	√	√
			SS1000	83,36 1	85,009		X
Revamp Trip + LS	99,809	100	11 kV MVSW GR	97,58 7	100,01	√	√
			SS1000	83,38 7	91,53		√
GTG off + Utility trip	90.065	91.316	11 kV MVSW GR	90.28 5	90.984	X	√
			SS1000	92.69 6	97.58		√
GTG off + Utility trip + LS	98.927	99.791	11 kV MVSW GR	90.85 6	100.04	√	√
			SS1000	93.07 2	99.997		√

Tabel 4.4 Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Generator *Outage* (lanjutan)

Kasus	f(%) min	f(%) steady state	ID Bus	V(%) min	V(%) steady state	kondisi	
						f	V
GTG off + Revamp Gen trip	99,748	100	11 kV MVS WGR	96,52 5	99,799	√	√
			SS10 00	80,80 2	82,862		X
GTG off + Revamp Gen trip + LS	99,736	100	11 kV MVS WGR	96,64 4	99,94	√	√
			SS10 00	80,80 3	90,329		√
GTG off + GGCP trip	99,171	100	11 kV MVS WGR	89,76 1	90,215	√	√
			SS10 00	97,62 8	99,695		√
Revamp TripGTG off + GGCP trip + LS	99,171	100	11 kV MVS WGR	89,97 5	96,289	√	√
			SS10 00	97,80 8	100,42		√

Tabel 4.5 Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Generator *Outage* (lanjutan)

Kasus	f(%) min	f(%) steady state	ID Bus	V(%) min	V(%) steady state	kondisi	
						f	V
GTG off + UBB trip	99,692	100	11 kV MVS WGR	96,89 8	99,904	√	√
			SS10 00	96,87 7	99,722		√
GTG off + UBB trip + LS	99,526	100	11 kV MVS WGR	96,90 3	100,08	√	√
			SS10 00	96,83 7	99,99		√
GGCP off + Utility trip	77,086	108,73	11 kV MVS WGR	8,2	53	X	X
			SS10 00	0,648	31,823		X
GGCP off + Utility trip + LS	98,303	99,403	11 kV MVS WGR	89,62 1	94,876	√	√
			SS10 00	97,04 7	99,924		√
GGCP off + Revamp Gen trip	99,594	100	11 kV MVS WGR	91,19 2	92,459	√	√
			SS10 00	81,27	82,725		X

Tabel 4.6 Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Generator *Outage* (lanjutan)

Kasus	f(%) min	f(%) steady state	ID Bus	V(%) min	V(%) steady state	kondisi	
						f	V
GGCP off + Revamp Gen trip + LS	99,592	100	11 kV MVS WGR	91,45 6	94,906	√	√
			SS10 00	81,07 6	90,412		√
GGCP off + GTG trip	99,784	100	11 kV MVS WGR	88.17 1	88.931	√	X
			SS10 00	95.08 4	99.312		√
GGCP off + GTG trip + LS	99,784	100	11 kV MVS WGR	88.45 7	95894	√	√
			SS10 00	95.30 9	100.13		√

Tabel 4.7 Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan Ketika Hubung Singkat

Kasus	f(%) min	f(%) steady state	ID Bus	V(%) min	V(%) steady state	kondisi	
						f	V
SC 0,4 kV	99,988	100	11 kV MVSWGR	95,99	100,12	√	√
			SS1000	98,93	100,07		√
SC 6 kV	99,892	100	11 kV MVSWGR	85,37	100,09	√	√
			SS1000	87,34	100,07		√
SC 20 kV	96,769	100	11 kV MVSWGR	40,5	99,97	√	√
	98,779	99,438	SS1000	42,29	100,58		√

Tabel 4.8 Rekapitulasi Frekuensi dan Tegangan *Motor Starting*

Kasus	f(%) min	f(%) steady state	ID Bus	V(%) min	V(%) steady state	kondisi	
						f	V
P21201A	99,668	100	Bus 21B	92,04	100,05	√	√

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a) Dari 8 kasus lepasnya pembangkit, 6 diantaranya dapat menyebabkan kondisi sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik berbahaya karena respon frekuensi, respon sudut rotor, dan respon tegangan sistem melebihi standar yang diizinkan sehingga perlu dilakukan mekanisme pelepasan beban untuk mengembalikan kestabilan sistem.
- b) Pada kasus hubung singkat didapatkan bahwa ketika terjadi kasus SC 0.4 kV dan SC 6 kV sistem masih mampu mempertahankan kestabilannya. Sementara pada kasus SC 20 kV menyebabkan Pabrik 3B terpisah dari sistem keseluruhan dan generator Revamp Gen tidak mampu memenuhi kebutuhan daya beban pada pabrik 3B, oleh karena itu dilakukan mekanisme pelepasan beban untuk mengembalikan kestabilan sistem.
- c) PT. Petrokimia Gresik cukup handal dalam kasus *starting* pada motor. Penyalaan motor 1670 kW secara *direct* saat 3 generator dalam kondisi aktif masih diizinkan dengan respon tegangan, respon frekuensi, dan respon sudut rotor yang memiliki penyimpangan relatif aman terhadap standar yang diizinkan.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk memperbaiki sistem setelah melakukan analisis adalah sebagai berikut :

- a) Sebaiknya dalam perancangan pelepasan beban, beban-beban yang dilepas harus di dekat generator yang mengalami kasus *outage/lepas*.
- b) Untuk kasus hubung singkat perlu diperhatikan nilai dari kedip tegangan karena dapat mempengaruhi kerja dari peralatan yang terdapat dalam pabrik.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Classification of Power System Stability*”*IEEE Transactions on Power system* , vol. 19, no. 2, may 2004.
- [2] Das, J.C., “*Transient in Electrical System, Analysis ,Recognition, and Mitigation*“ , McGraw-Hill, Inc, 2010.
- [3] Kundur, P., “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [4] Stevenson, W.D., Jr and Granger, J.J., “*Elements of Power System Analysis, 4th Edition*”. McGraw-Hill, Inc, 1994
- [5] Hafidz, Isa., “Analisis Stabilitas Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban di Project Pakistan Deep Water Container Port”, 2014.
- [6] Soeprijanto, Adi. “Desain Kontroller untuk Kestabilan Dinamik Sistem tenaga Listrik”. ITS Press, Surabaya, 2012.
- [7] Prahadi, Chafid., “Analisis Kestabilan Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban pada PT. PERTAMINA *REFINERY UNIT V BALIKPAPAN*”, 2014.
- [8] IEEE, “*Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*”, 1987. IEEE Std C37.106-2003 (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987).

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BIODATA PENULIS



Rahmat Saiful Anwar, dilahirkan di Kabupaten Probolinggo, Jawa Timur pada 04 April 1995. Penulis adalah putra pertama dari pasangan Budi dan Musawamah. Memulai jenjang pendidikan di TK Taruna Dra. Zulaeha, kemudian melanjutkan pendidikan formal di SD Taruna Dra. Zulaeha, SMP Taruna Dra. Zulaeha, dan SMA Taruna Dra. Zulaeha hingga lulus pada tahun 2013. Pada tahun itu juga, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama kuliah, penulis aktif dalam mahasiswa kegiatan organisasi sebagai staff departemen dalam negeri BEM FTI-ITS 2014/2015 dan sebagai kepala departemen dalam negeri BEM FTI-ITS 2015/2016, penulis juga aktif sebagai asisten Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga Listrik dan koordinator asisten di Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui email rahmatasaifulanwr@gmail.com.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

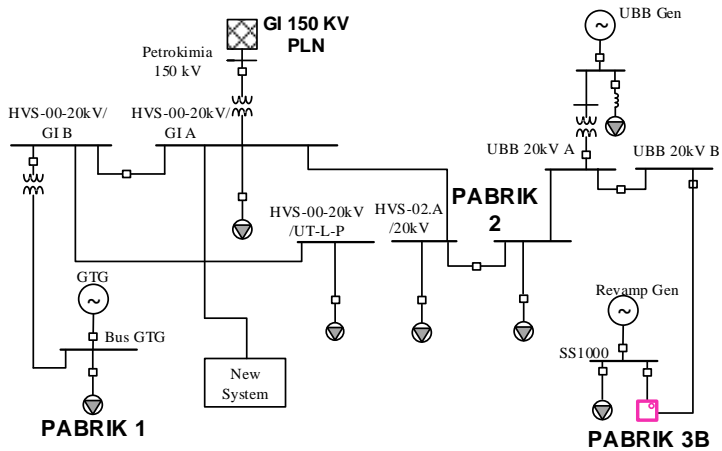
LAMPIRAN

I. Data Skala Prioritas Pelepasan beban

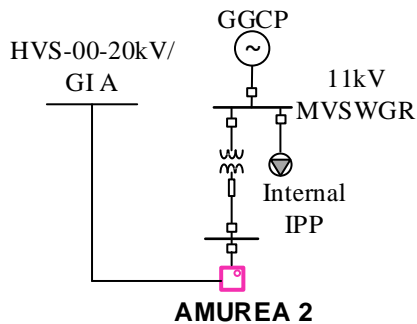
ID CB	Beban	Prioritas Pelepasan Beban	kW	Total Pelepasan Beban
FC	03MC202	20	105	404
CB-28.0	Utilities		299	
CB-08	PF-1	19	1500	1904
CB-39	SP-36	18	350	2254
CB-30	NPK 1,2,3 dan 4	17	2655	4909
CB-01	PF-1 U,300	16	1743	6652
UT-02A	Phonska 1	15	1978	8630
CB-16	Phonska 2	14	447	11111
CB-07	Phonska 2		2034	
CB-29	Phonska 3	13	1309	13475
CB-275	Phonska 3		1055	
CB-44	Phonska 4	12	2103	15578
CB-06	HVS-1	11	141	15719
CB 10	CT 1212C	10	220	16159
CB 2	CT 1212B		220	
CB 29	ZA I/III	9	580	16739
8	01-HVS-1100	8	3765	20504
CB-37	Trestel Conv.	7	92	21947
CB-16	HVS-2210-03		1351	
CB-38	LVS-CSU	6	402	22617
CB-273	Utilities (03.900)		268	
CB-96	KC 2, LTP-72	5	316	23517
CB-94	Street Lighting & Boiler UT-2A		584	
CB-45	Pelabuhan	4	1804	25321
GCB/OCB	K2SO4 atau ZK	3	112	25433

ID CB	Beban	Prioritas Pelepasan Beban	kW	Total Pelepasan Beban
20	Blower untuk Fluidizing cooler	2	159	27455
16	TR 2282 D (Urea)		441	
23	Cooling water pump		1164	
10	TR 2282 C (urea)		258	
25	Boiler Feed Water	1	318	34805
15	TR 2282 B (NH3)		269	
22	Cooling water pump		1164	
21	Cooling water pump		1099	
3	Cooling water pump		1113	
2	Cooling water pump		1063	
9	TR 2282 A (NH3)		391	
CB 16	C 1101C		325	
CB 15	C 1101B		240	
CB 14	CT 1216C		253	
CB 13	CT 1216B		277	
CB 12	CT 1216A		228	
CB 3	Boiled feed water MP1103A		258	
GI 03	Boiler Feed PP-2200-01		352	
CB 36	Tangki NH3 TK-06	0	210	35421
CB 274	Petrosida		145	
CB-15	Tangki NH3 TK-11		261	

II. Single Line Diagram PT. Petrokimia Gresik



III. Single Line Diagram pembangkit dan Beban Baru PT. Petrokimia Gresik



Setting Governor

Type : GT
Generator : GGCP

11 kV	26.8 MW	Voltage Control
-------	---------	-----------------

☒ Built-in
 ☐ UDM

Type: GT
 Mode: Droop

Sample Data

Droop	Pmax	Pmin
4	23.1	10

Tsr	Tc	Tt
0.15	0.1	0.1

Type : 505
Generator : UBB

6 kV	32 MW	Voltage Control
------	-------	-----------------

☒ Built-in
 ☐ UDM

Type: 505
 Mode: Droop
 Priority: Load

Sample Data

Droop 1	I1 <D>	SDR1	RampRate
4	6	5	0.03

P1 <I>	I1 <I>	SDR1 <I>	EFmax	P1 <D>
3	6	5	162	3

L1	L2	Ta1	Tm1	TS
100	-30	1	1	0.015

Droop2	P2	I2	SDR2	ExtPress	ExtFlow
4	3	6	5	1	1

HPa	HPb	HPc	HPmax	Sa	Sb
84	172	30	172	24865	9600

Sc	Smax	L3	L4	Ta2	Tm2
-400	21000	100	0	1	1

Type : ST
Generator : Revamp Gen

6 kV 17,5 MW Voltage Control

☒ Built-in ☐ UDM

Type

Mode

ST

Droop

Sample Data

Droop

5

Pmax

17,5

Pmin

0

Fhp

0,7

Tsr

0,1

Tc

0,1

Tch

0,15

Tth

5

Type : GGOV3

Generator : GTG

11,5 kV 33 MW Voltage Control

☒ Built-in

☐ UDM

Type

Mode

GGOV3

Droop

Sample Data

R	Rselect	Ldref	Tpelec	Kimw	Pmwset	Kpgov	Kigov
0,04	1	1	2,5	0,002	0	10	1,33
Kdgov	Tdgov	Kpload	Kload	Ka	Ta	Aset	Dm
0	1	2	0,67	10	0,05	0,01	-2
Vmax	Vmin	Ffa	Ffb	Ffc	Ffd	Dnrate	Dnhi
1	0,15	0	1	1	1	0,0002	0,1
Dnlo	Ropen	Rclose	Rup	Rdown	Maxerr	Minerr	Kturb
-0,1	3,3	-3,3	2	-2	0,01	-0,01	1,8
Wfnl	Tact	Tb	Tc	Db	Tsa	Tsb	Tfload
0,18	0,2	0,5	0	0	4	5	3
Tbd	Tcd	Teng	Cp	Cf	Flag	Turbrate	
4	3	0	0	20	1	24	